

# UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



TRABAJO FIN DE GRADO

GRADO EN INGENIERÍA ELÉCTRICA

## **SOBRETENSIONES EN LA DESCONEXIÓN EN VACÍO DE TRANSFORMADORES DE POTENCIA**

Autor: Víctor Utrilla Miguel

Tutor: Juan Carlos Burgos

Leganés, 2017



## *Agradecimientos*

Antes de nada, he de agradecer a Juan Carlos su gran labor, por su ayuda y constancia durante todos estos meses realizando este trabajo, pues quizá sin él este trabajo no habría sido posible. También, aprovecho para agradecerle el gran trabajo que realiza impartiéndonos clase.

A mi familia, por su lealtad y constante apoyo durante toda mi vida y en toda mi etapa universitaria y como estudiante, mostrando su gran apoyo cuando las cosas no salían tan bien, y animándome cuando conseguía una victoria. Todo esto, es por vosotros gracias.

A mis grandes amigos, el Kaos y el Dispensa, por su constante apoyo en esos duros momentos en los que se hace difícil compaginar, trabajo, estudios y amistades.

## Índice

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN .....	11
1.1    PLANTEAMIENTO PROBLEMA .....	12
1.2    MARCO REGULADOR.....	12
1.3    OBJETIVOS DEL TFG.....	18
CAPÍTULO 2 TRANSFORMADORES DE POTENCIA.....	19
2.1    MISIÓN DE UN TRANSFORMADOR.....	19
2.2    CONSTITUCIÓN FÍSICA.....	19
2.3    PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO.....	22
2.4    FUNCIONAMIENTO EN VACÍO DE TRANSFORMADORES.....	23
2.5    PÉRDIDAS EN EL HIERRO DE UN TRANSFORMADOR.....	26
CAPÍTULO 3 CORTE DE CORRIENTES EN UN DISYUNTOR.....	28
3.1    TIPOS DE INTERRUPTORES .....	29
3.2    INTERRUPCIÓN DE CORRIENTE EN UN INTERRUPTOR.....	31
3.3    TENSIÓN TRANSITORIA DE RESTABLECIMIENTO (TTR). ....	33
3.4    EXTINCIÓN DE LA CORRIENTE EN UN CIRCUITO ELÉCTRICO .....	35
CAPÍTULO 4 EL PROGRAMA ATP .....	38
4.1    EL ATP.....	38
4.2    MODELOS DE TRANSFORMADOR.....	38
CAPÍTULO 5 SOBRETENSIONES DEBIDAS AL CORTE DE PEQUEÑAS CORRIENTES INDUCTIVAS.....	42
5.1    INTRODUCCIÓN .....	42
5.2    TRANSITORIO DE DESCONEXIÓN DE UN TRANSFORMADOR SIN PÉRDIDAS EN VACÍO ....	42
5.2.1    TRANSITORIO EN EL CASO DE QUE LA APERTURA DEL CIRCUITO SE PRODUZCA EN EL PASO POR CERO DE LA CORRIENTE .....	43
5.2.2    TRANSITORIO EN CASO DE QUE SE PRODUZCA ARRANQUE DE CORRIENTE .....	44
5.3    CASO DE CEBADO DEL ARCO EN EL INTERRUPTOR.....	46
CAPÍTULO 6 SIMULACIONES REALIZADAS.....	47
6.1    DIFERENCIAS ENTRE LA SIMULACION POR ELEMENTOS DISCRETOS FRENTE A LA SIMULACION CON BCTRAN .....	48
6.1.1    MODELADO A PARTIR DE ELEMENTOS DISCRETOS .....	48
6.1.2    MODELADO MEDIANTE TRANSFORMADOR BCTRAN .....	49

6.1.3	COMPARATIVA MODELADO MEDIANTE ELEMENTOS DISCRETOS FRENTE MODELADO POR BCTRAN .....	50
6.2	INFLUENCIA DE LOS INSTANTES DE CORTE EN LA SOBRETENSIÓN .....	54
6.2.1	TRANSFORMADOR 1 .....	54
6.2.2	TRANSFORMADOR 2 .....	60
6.2.3	TRANSFORMADOR 3 .....	64
6.2.4	COMPARATIVA TRANSFORMADORES .....	67
6.3	COMPARACIÓN EN FUNCIÓN DE LAS CAPACIDADES PARÁSITAS DEL TRANSFORMADOR .....	68
6.3.1	TRANSFORMADOR 4 .....	68
6.3.2	TRANSFORMADOR 5 .....	76
6.3.3	COMPARATIVA ENTRE TRANSFORMADORES .....	81
6.4	INFLUENCIA DE LAS PERDIDAS EN EL HIERRO .....	82
6.4.2	TRANSFORMADOR 1 .....	82
6.4.3	TRANSFORMADOR 3 .....	89
6.4.4	COMPARACIÓN TRANSFORMADOR 1 Y 3 CON PÉRDIDAS .....	95
CAPÍTULO 7 RESULTADOS .....		96
7.1	SOBRETENSIONES TRANSITORIAS EN EL TRANSFORMADOR .....	96
7.1.1	ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE DIFERENTES FACTORES EN EL VALOR DE LA SOBRETENSIÓN .....	96
CAPÍTULO 8 RESUMEN Y CONCLUSIONES .....		101
8.1	RESUMEN DEL TRABAJO REALIZADO .....	101
8.2	CONCLUSIONES .....	102
8.3	TRABAJO FUTURO .....	103
CAPÍTULO 9 BIBLIOGRAFÍA .....		104

## Índice de Figuras

Figura 1.1: Onda de impulso tipo rayo.....	14
Figura 1.2: Onda de impulso tipo maniobra. ....	15
Figura 2.1 : Esquema de funcionamiento de un transformador.....	19
Figura 2.2 : Representación esquemática de los arrollamientos en un núcleo de columnas.....	21
Figura 2.3 : Representación esquemática de los arrollamientos en un núcleo acorazado. ....	21
Figura 2.4 : Representación de la curva magnetizante.....	25
Figura 2.5 : Representación de todos parámetros del transformador en función del tiempo.....	25
Figura 3.1 : Distribución de la temperatura del arco para el caso de arcos de elevadas corrientes y arcos de bajas corrientes [DAS10]. ....	31
Figura 3.2 : Resistencia y caída de tensión en el arco, en función de la corriente del mismo.....	32
Figura 3.3 : Caso más habitual de línea inductiva con capacidades parásitas.....	33
Figura 3.4 : Caso en el que el interruptor actúa cuando la corriente está en régimen permanente. ....	34
Figura 3.5 : Caso en el que el interruptor actúa cuando la corriente se encuentra aún en el transitorio.....	34
Figura 3.6 : Interrupción dieléctrica.....	35
Figura 3.7 : Circuito puramente resistivo.....	35
Figura 3.8 : Instantes de extinción de la corriente y los instantes de recabado del arco entre contactos del interruptor.....	36
Figura 4.1 : Circuito equivalente del transformador híbrido. ....	41
Figura 5.1 : Circuito equivalente del transformador.....	42
Figura 5.2 : Representación durante el corte de una pequeña corriente inductiva en el paso por cero.....	44
Figura 5.3 : Representación durante el corte de una pequeña corriente inductiva antes del paso por cero.....	45
Figura 6.1-1 : Esquema modelado mediante elementos discretos. ....	48
Figura 6.1-2 : Esquema modelado mediante elementos discretos. ....	49
Figura 6.1-3 : Representación tensión en las ramas R, RL y RC. ....	50
Figura 6.1-4 : Representación corriente en la rama R y RL.....	50
Figura 6.1-5 : Representación corriente en la rama RC. ....	51
Figura 6.1-6 : Representación tensión en las ramas R, RL y RC.....	51
Figura 6.1-7 : Representación corriente en la rama R, RC y RL.....	51
Figura 6.1-8 : Representación tensión en las ramas R, BCTRAN y RC.....	52
Figura 6.1-9 : Representación corriente en la rama R y BCTRAN. ....	52
Figura 6.1-10 : Representación corriente en la rama RC. ....	52
Figura 6.1-11 : Representación tensión en las ramas R, BCTRAN y RC.....	53
Figura 6.1-12 : Representación corriente en la rama R, RC y BCTRAN. ....	53
Figura 6.2-1 : Representación del corte de corriente de la línea, en el instante máximo.....	54
Figura 6.2-2 : Representación de la evolución de corriente en el transformador.....	55
Figura 6.2-3 : Representación de la evolución de corriente en la rama RC.....	55

Figura 6.2-4	: Representación de la evolución de tensión. ....	56
Figura 6.2-5	: Representación del corte de corriente de la línea. ....	57
Figura 6.2-6	: Representación de la evolución de corriente en el transformador y en la rama RC. ....	57
Figura 6.2-7	: Representación de la evolución de tensión. ....	58
Figura 6.2-8	: Representación de las corrientes. ....	60
Figura 6.2-9	: Representación de las tensiones. ....	61
Figura 6.2-12	: Representación de las corrientes. ....	64
Figura 6.2-13	: Representación de las tensiones. ....	65
Figura 6.2-14	: Representación de las corrientes. ....	65
Figura 6.2-15	: Representación de las tensiones. ....	66
Figura 6.3-1	: Representación del circuito del transformador 4 con su capacidad en el lado de alta tensión. ....	69
Figura 6.3-2	: Representación de las corrientes. ....	69
Figura 6.3-2	: Representación de las tensiones. ....	70
Figura 6.3-3	: Representación de las corrientes. ....	70
Figura 6.3-4	: Representación de las tensiones. ....	71
Figura 6.3-5	: Representación del circuito con capacidades en alta, baja y en paralelo. ....	72
Figura 6.3-6	: Representación de las corrientes de red y del transformador. ....	72
Figura 6.3-7	: Representación de las corrientes de los condensadores, en las que la corriente del condensador en alta y en paralelo coinciden. ....	73
Figura 6.3-8	: Representación de las Tensiones, en las que la tensión en baja es la pequeña, el resto son coincidentes. ....	73
Figura 6.3-9	: Representación de las corrientes, en las que la corriente en baja y en paralelo son la misma. ....	74
Figura 6.3-10	: Representación de las tensiones. ....	74
Figura 6.3-11	: Representación de las corrientes. ....	76
Figura 6.3-12	: Representación de las tensiones. ....	77
Figura 6.3-13	: Representación de las corrientes. ....	77
Figura 6.3-14	: Representación de las tensiones. ....	78
Figura 6.3-15	: Representación de las corrientes. ....	78
Figura 6.3-16	: Representación de las tensiones. ....	79
Figura 6.3-17	: Representación de las corrientes. ....	79
Figura 6.3-18	: Representación de las tensiones. ....	80
Figura 6.4-1	: Representación de las corrientes. ....	83
Figura 6.4-2	: Representación de las tensiones. ....	83
Figura 6.4-3	: Representación de las corrientes. ....	84
Figura 6.4-4	: Representación de las tensiones. ....	84
Figura 6.4-5	: Representación de las corrientes (FIGURA IZAQUIERDA) y tensiones (FIGURA DERECHA). ....	85
Figura 6.4-6	: Representación de las corrientes y tensiones. ....	86
Figura 6.4-7	: Representación de las corrientes y tensiones. ....	87

Figura 6.4-8	: Representación de las corrientes y tensiones. ....	88
Figura 6.4-1	: Representación de las corrientes.....	89
Figura 6.4-2	: Representación de las tensiones. ....	89
Figura 6.4-3	: Representación de las corrientes.....	90
Figura 6.4-4	: Representación de las tensiones .....	90
Figura 6.4-5	: Representación de las corrientes y tensiones. ....	91
Figura 6.4-6	: Representación de las corrientes y tensiones. ....	92
Figura 6.4-7	: Representación de las corrientes y tensiones. ....	93
Figura 6.4-8:	: Representación de las corrientes y tensiones. ....	94



## Índice de Tablas

Tabla 1: Relación entre las tensiones soportadas asignadas normalizadas a impulso tipo maniobra y las mínimas distancias de aislamiento en el aire fase-tierra (Tabla A.2 de la norma UNE 60071-1). .....	16
Tabla 2: Relación entre las tensiones soportadas asignadas normalizadas a impulso tipo rayo y las mínimas distancias de aislamiento en el aire (Tabla A.1 de la norma UNE 60071-1).....	17
Tabla 3: Datos de los cinco modelos de transformadores con los que trabajaremos. ....	47
Tabla 4: Datos de las impedancias de los mismos transformadores con los que trabajaremos. ....	47
Tabla 5: Datos transformador 1. ....	54
Tabla 6: Resultados obtenidos en la primera simulación del transformador 1. ....	56
Tabla 7: Resultados de la segunda simulación del transformador 1. ....	58
Tabla 8: Datos del transformador 2. ....	60
Tabla 9: Resultados obtenidos en la primera simulación del transformador 2. ....	61
Tabla 10: Resultados obtenidos en la segunda simulación del transformador 2. ....	63
Tabla 11: Datos del transformador 3. ....	64
Tabla 12: Resultados obtenidos en la primera simulación del transformador 3. ....	65
Tabla 13: Resultados obtenidos en la segunda simulación del transformador 3. ....	66
Tabla 14: Datos transformador 4. ....	68
Tabla 15: Resultados obtenidos en la primera simulación del transformador 4. ....	70
Tabla 16: Resultados obtenidos en la segunda simulación del transformador 4. ....	71
Tabla 17: Datos de los condensadores del transformador 4. ....	72
Tabla 18: Resultados obtenidos en la tercera simulación del transformador 4. ....	73
Tabla 19: Resultados obtenidos en la cuarta simulación del transformador 4. ....	75
Tabla 20: Datos del transformador 5. ....	76
Tabla 21: Resultados obtenidos en la primera simulación del transformador 5. ....	77
Tabla 22: Resultados obtenidos en la segunda simulación del transformador 5. ....	78
Tabla 23: Resultados obtenidos en la tercera simulación del transformador 5. ....	79
Tabla 24: Resultados obtenidos en la cuarta simulación del transformador 5. ....	80
Tabla 25: Datos pérdidas transformador 1. ....	82
Tabla 26: Resultados obtenidos en la primera simulación del transformador 1 con pérdidas. ....	83
Tabla 27: Resultados obtenidos en la segunda simulación del transformador 1 con pérdidas. ....	84
Tabla 28: Resultados obtenidos en la simulación de interrupción en el paso por cero de la corriente en el transformador 1 sin pérdidas. ....	85
Tabla 29: Resultados obtenidos en la simulación de interrupción en el paso por cero de la corriente en el transformador 1 con pérdidas. ....	86
Tabla 30: Resultados obtenidos en la simulación de interrupción en el paso por el máximo de la corriente en el transformador 1 sin pérdidas. ....	87
Tabla 31: Resultados obtenidos en la simulación de interrupción en el paso por el máximo de la corriente en el transformador 1 con pérdidas. ....	88
Tabla 32: Datos de las pérdidas del transformador 3. ....	89
Tabla 33: Resultados obtenidos en la primera simulación con pérdidas del transformador 3. ....	90

Tabla 34: Resultados obtenidos en la segunda simulación con pérdidas del transformador 3.....	91
Tabla 35: Resultados obtenidos en la simulación de interrupción de corriente en el paso por cero del transformador 3 sin pérdidas. ....	91
Tabla 36: Resultados obtenidos en la simulación de interrupción de corriente en el paso por cero del transformador 3 con pérdidas. ....	92
Tabla 37: Resultados obtenidos en la simulación de interrupción de corriente en el paso por el máximo del transformador 3 sin pérdidas. ....	93
Tabla 38: Resultados obtenidos en la simulación de interrupción de corriente en el paso por el máximo del transformador 3 con pérdidas.....	94

# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

En el mundo actual muchos de los procesos, prácticamente todos, en un momento u en otro, se basan en la electricidad y no sería concebible actualmente una vida sin electricidad. De la misma manera, tampoco es concebible que la electricidad sea un bien o un servicio muy caro. Esto requiere que, en todos los eslabones de la cadena del sistema eléctrico, desde la generación, al consumo, pasando por transporte, transformación y distribución, se ahorre en todos los detalles que conlleven.

Por tanto, enlazando a nuestro caso particular, cuanto mejor sea el funcionamiento de un transformador, mejor será todo el proceso del sistema eléctrico. Para ello, uno de los problemas importantes a los que se enfrentan estos transformadores son las sobretensiones.

Los equipos eléctricos deben tener un aislamiento acorde con las sobretensiones que van a tener que soportar en campo. Se trata de elegir el equipo eléctrico con unos requisitos mínimos, para también ahorrar en este aspecto, pero que sean superiores a las solicitudes que van a soportar. Ello requiere hacer estudios y simulaciones para conocer estas solicitudes que los equipos eléctricos van a tener que superar.

Las tensiones que deben soportar los equipos eléctricos, son marcadas por la normativa europea y dependen de la tensión nominal de los equipos, pero aun así disponemos de cierto margen de maniobra.

Durante la desconexión de un transformador en vacío, se pueden llegar a generar sobretensiones de gran magnitud, de ahí la importancia de su estudio, sobre todo por el gran peligro que pueden generar al sistema de aislamiento del mismo, que pese a estar preparado para soportarlo con el envejecimiento del sistema, y tras numerosas veces que puedan llegar a su límite, pueden llegar a fallar.

Los interruptores de potencia son capaces de cortar la corriente para la cual están diseñados. No obstante, la interrupción de la corriente no se realiza en el preciso momento en el que se separan los contactos del interruptor, sino que al separarse los contactos la corriente se perpetúa mediante un arco eléctrico entre los contactos. Sin embargo, cuando un interruptor de gran corriente corta una corriente de valor reducido, puede ocurrir que la corriente se corte antes del paso por cero de la onda. Todo esto, produce sobretensiones en los transformadores que pueden ser de gran consideración por el daño que les pueda acarrear.

Por tanto, será un tema importante a conocer sobre los transformadores, la sobretensión que se generan tras una mala interrupción de corriente. Para posteriormente poder dimensionar correctamente, el sistema de aislamiento, las protecciones y los interruptores o disyuntores del sistema.

## 1.1 PLANTEAMIENTO PROBLEMA

Durante este trabajo tendremos el objetivo de comprobar los diferentes aspectos que influyen en las sobretensiones generadas durante una desconexión inadecuada de un transformador.

Para ello, realizaremos varias simulaciones mediante el programa ATPDraw, con diferentes transformadores, planteando para cada uno de ellos distintos casos, para poder comprobar así, los diferentes factores que pueden intervenir e influir en la magnitud de las sobretensiones generadas en la desconexión del transformador.

Los principales casos, que plantearemos a estudio para ver su influencia en la generación de estas sobretensiones serán, el instante de interrupción de corriente, los condensadores tenidos en cuenta en el sistema del transformador y las pérdidas en el hierro. Cada uno de estos casos, influirá de diferente forma en las sobretensiones. Finalmente, conseguiremos entender en qué casos nos es más favorable o menos interrumpir la corriente de un transformador, para evitar dañarlo lo menos posible.

## 1.2 MARCO REGULADOR

Los diferentes equipos de una instalación eléctrica están regulados por una serie de normativas europeas que deben de ser cumplidas en todo caso, para conseguir así la máxima seguridad en el funcionamiento de los mismos.

Estas normativas, imponen desde aspectos técnicos y físicos de estos equipos, hasta materiales con los que pueden o deben de ser contruidos y ensayos a los que deben de ser sometidos antes de ponerlos en funcionamiento real, para asegurarnos en todo caso que podrán superar sus máximas sollicitaciones en campo.

La normativa europea por la que se rigen los transformadores de potencia es la UNE 60076, y entre muchos temas de los que tratan, para nuestro trabajo nos pueden interesar temas como los límites de sobretensiones a los que pueden estar sometidos estos transformadores, los ensayos que deben de ser capaces de superar y la coordinación de aislamiento de los sistemas eléctricos que se dan en la norma UNE 60071.

Entorno a estos temas principales que podrían tener un aspecto más directo a nuestro trabajo, podemos hacer una breve descripción de los mismos, según nos marca la normativa:

- Ensayos a los que serán sometidos los transformadores:

En la normativa, acerca de los ensayos a los que deben de ser sometidos los transformadores, en primer lugar, hace referencia a cómo y dónde deben de ser realizados estos ensayos. Estos, deben de ser realizados por los propios fabricantes en sus propios talleres, a menos que el propio dueño quiera comprobar los ensayos en su campo de aplicación directamente. Los ensayos, además, deben de ser realizados con todos los componentes exteriores y accesorios que puedan influir al comportamiento del transformador. Todos los ensayos, deben de ser medidos mediante aparatos de medida certificados mediante otra normativa, la norma ISO 9001.

Existen muchos tipos de ensayos, muchos serán obligatorios, otros solo en determinadas ocasiones por algún caso especial de determinados transformadores y otros incluso serán opcionales a realizar por el propio comprador para su caso específico. Por ello, comentaremos los ensayos más importantes:

- Ensayo de tensión soportada

Este ensayo se realiza aplicando corriente alterna monofásica, la cual debe de ser muy próxima a la forma sinusoidal real y como mínimo al 80% de la frecuencia asignada.

Durante el ensayo se medirá el valor de cresta de la onda. El ensayo comenzará con un valor menor a un tercio del valor de cresta entre  $\sqrt{2}$  y se irá aumentando la tensión hasta este valor y seguidamente se reducirá rápidamente de nuevo el valor de la tensión. La máxima tensión se debe aplicar durante 60 s.

El ensayo será positivo si la tensión no colapsa, se mantiene estable.

- Ensayo de impulso tipo rayo

Los impulsos tipo rayo, también llamados, de frente rápido, tratan de reproducir las sobretensiones atmosféricas producidas por caídas de rayos sobre las líneas. Estos impulsos, se caracterizan por un frente rápido en los que el pico, debe alcanzarse en valores,  $0,1 \mu s \leq T_p \leq 20 \mu s$ . La onda de este tipo de impulso, tiene la siguiente forma:

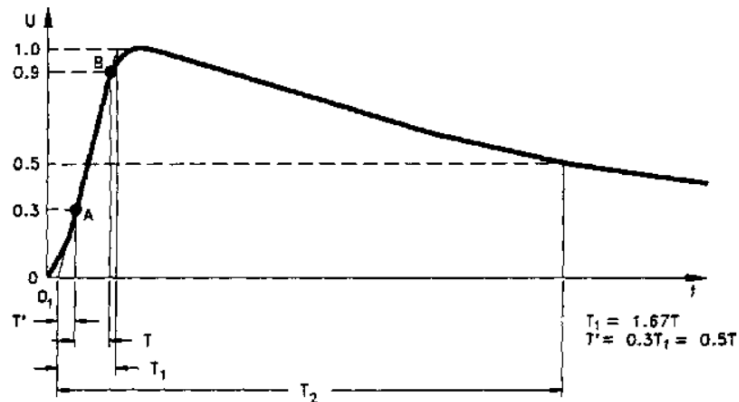


Figura 1.1: Onda de impulso tipo rayo.

Estos ensayos solo se realizarán en los arrollamientos del transformador cuyos bornes salgan a través de la cuba o de la tapa del transformador.

El ensayo tiene como objetivo comprobar la resistencia al impulso de cada extremidad de la línea con respecto a tierra y a los devanados, así como la resistencia al impulso a lo largo del propio devanado.

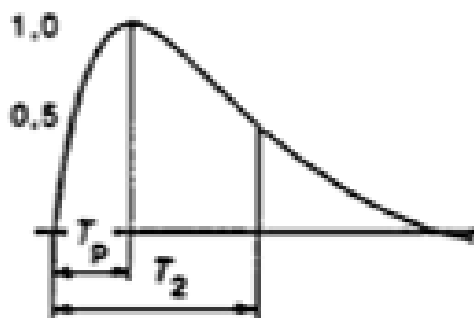
El ensayo consistirá en aplicar una tensión de impulso entre el 50% y el 70% de la tensión plena del ensayo, y tres impulsos seguidos a tensión plena.

Si tras el ensayo, no se encuentran diferencias importantes entre las formas de onda de la tensión y de la corriente, correspondientes a una tensión reducida y a una a plena tensión, esto significara que el transformador y sus aislamientos han superado el ensayo.

- Ensayo de impulso tipo maniobra

Este ensayo se realiza para controlar, sobretensiones que puedan ser originadas por la actuación de interruptores, aparición y eliminación de faltas y descargas atmosféricas en puntos alejados.

Este ensayo, funciona de igual manera que el anterior, a diferencia de que la onda tipo maniobra es más lenta y suavizada, en la que el tiempo de subida debe de ser  $20 \mu s \leq T_p \leq 5000 \mu s$ . Y podríamos representarla mediante la siguiente figura:



*Figura 1.2: Onda de impulso tipo maniobra.*

Además, en el ensayo aplicará una tensión de impulso, entre unos valores algo mayores, entre el 50% y el 75% de la tensión plena del ensayo, y tres impulsos seguidos a tensión plena.

De igual manera, el ensayo será superado si no se han encontrado diferencias entre las formas de onda, tras haber aplicado los impulsos a una tensión y a tensión plena.

- Sobretensiones soportadas:

En relación a las tensiones máximas soportadas, existen una serie de valores normalizados para los diferentes sistemas eléctricos, que deben de soportar durante los ensayos. Además, estos valores de sobretensiones también dependerán de aspectos como las distancias mínimas entre los aislamientos.

A modo de ejemplo, incluiremos dos de estas tablas, cada una que haga referencia a cada uno de los ensayos que hemos explicado anteriormente.

Tensión soportada asignada normalizada a impulso tipo maniobra kV	Fase-tierra mínimo mm	
	Punto-estructura	Conductor-estructura
750	1 900	1 600
850	2 400	1 800
950	2 900	2 200
1 050	3 400	2 600
1 175	4 100	3 100
1 300	4 800	3 600
1 425	5 600	4 200
1 550	6 400	4 900
1 675	7 400 <sup>a</sup>	5 600 <sup>a</sup>
1 800	8 300 <sup>a</sup>	6 300 <sup>a</sup>
1 950	9 500 <sup>a</sup>	7 200 <sup>a</sup>
<sup>a</sup> Valores estimados aún en estudio.		

*Tabla 1: Relación entre las tensiones soportadas asignadas normalizadas a impulso tipo maniobra y las mínimas distancias de aislamiento en el aire fase-tierra (Tabla A.2 de la norma UNE 60071-1).*

La anterior tabla, nos viene a decir que si nosotros tenemos un transformador de 800 kV por ejemplo, este deberá de soportar 850 kV en un impulso tipo maniobra y además deberá de tener unas distancias mínimas entre fase-tierra de 2400 mm y 1800 mm, entre punto-estructura y conductor-estructura respectivamente.



De igual manera, funcionará la siguiente tabla, pero para el ensayo de impulso tipo rayo.

Tensión soportada asignada normalizada a impulso tipo rayo kV	Distancia mínima de aislamiento en el aire mm	
	Punto-estructura	Conductor-estructura
20	60	
40	60	
60	90	
75	120	
95	160	
125	220	
145	270	
170	320	
200	380	
250	480	
325	630	
380	750	
450	900	
550	1 100	
650	1 300	
750	1 500	
850	1 700	1 600
950	1 900	1 700
1 050	2 100	1 900

*Tabla 2: Relación entre las tensiones soportadas asignadas normalizadas a impulso tipo rayo y las mínimas distancias de aislamiento en el aire (Tabla A.1 de la norma UNE 60071-1).*

▪ Coordinación de aislamiento:

En cuanto a la coordinación de aislamiento, en la norma se hace referencia al procedimiento de selección de materiales e instalaciones que soporten diferentes aspectos peligrosos para el sistema eléctrico, sin hacer referencia en este caso a la seguridad humana. Algunos de estos aspectos que trata de resaltar, para realizar una buena selección de aparataje de aislamiento, son las relaciones de tensiones soportadas asignadas, las cuales deberían de ser siempre mayores a la tensión más elevada que pueda ser ocasionada.

Con este propósito, se deberían de observar ciertas características, que entre otras muchas algunas son las siguientes:

- Rigidez dieléctrica.
- Aislamiento externo, como puede ser la superficie de contacto con el ambiente y las condiciones atmosféricas.
- Aislamiento interno, distancias internas entre diferentes materiales de la instalación.

- Aislamiento autorregenerable y no regenerable.
- Bornes de la configuración de aislamiento (bornes de fase, neutro, tierra).
- Tensión nominal de la red.
- Tensión máxima de la red.
- Tensión máxima de los materiales.
- Instalación del neutro (a tierra, aislado...)
- Posibles sobretensiones.
- Tensión soportada ante diferentes impulsos.

Para la coordinación de aislamiento la UNE\_60071, también nos da una serie de procedimientos en los cuales basarse, para seleccionar la tensión más elevada del material y la tensión soportada. Para ello, se deben determinar las tensiones y sobretensiones ocasionadas en el sistema teniendo en cuenta las diferentes formas de onda que puedan darse. La norma nos da una serie de valores para todas estas características normalizados y ensayados mediante los cuales manteniéndose en sus límites en los diferentes casos que puedan darse, no debería de ocurrir ningún fallo.

### 1.3 OBJETIVOS DEL TFG

El objetivo principal de este trabajo fin de grado, es analizar los factores que influyen en el valor de las sobretensiones que se generan al desconectar un transformador en vacío. Además, nos encontraremos con los problemas y derivadas consecuencias, que pueden ocasionar las interrupciones y cortes de corriente de un sistema como este, en instantes de tiempo que no sean convenientes. Una vez, definidos y encontrados estos problemas, conseguiremos encontrar los factores, en diferentes transformadores, en los que se maximizan o minimizan estas consecuencias.

Para ello realizaremos un modelado del transformador mediante el programa ATPDraw y modificaremos determinados parámetros para recrear las sobretensiones y estudiar su magnitud.

## CAPÍTULO 2

### TRANSFORMADORES DE POTENCIA

Se denomina transformador de potencia al aparato eléctrico de corriente alterna que permite variar alguna función de la corriente como la tensión o la intensidad, manteniendo constante la frecuencia y la potencia en un transformador ideal.

#### 2.1 MISIÓN DE UN TRANSFORMADOR

La misión de un transformador es traspasar energía eléctrica entre dos sistemas eléctricos de diferente nivel de tensión.

Por tanto, su función será convertir o transformar la corriente alterna de alta tensión y baja intensidad a otra de menor tensión y mayor intensidad, o viceversa, según la relación de transformación que corresponda a cada transformador de potencia.

#### 2.2 CONSTITUCIÓN FÍSICA

Para poder explicar a continuación el funcionamiento de un transformador, comentaremos brevemente su constitución física y su similitud a un circuito magnético.

Un transformador, como mínimo debe de estar formado por un núcleo de hierro, que hará de núcleo magnético y por dos o más arrollamientos o devanados, de un número de espiras concreto ( $N$  en la figura 2.1) y uno de ellos (el primario en el caso de la figura 2.1) conectado a una fuente.

Los devanados se dispondrán en una columna cada uno, y estas se unirán por medio de dos culatas que los unen horizontalmente.

Por tanto, entre los arrollamientos quedará el núcleo magnético por el que circulará el flujo magnético encargado de traspasar esta energía del primario al secundario.

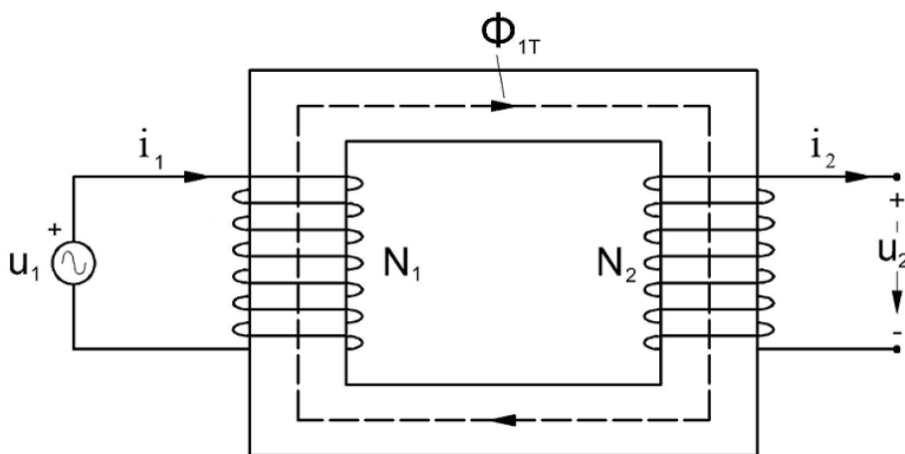


Figura 2.1 : Esquema de funcionamiento de un transformador.

El núcleo magnético, suele estar constituido por delgadas chapas de acero de silicio, para reducir el efecto de las corrientes parásitas, ya que la presencia de silicio en el acero aumenta la resistividad del mismo.

Por el núcleo magnético también circulará el flujo, anteriormente mencionando, y como este núcleo está formado por un material conductor, también engendrará en él una fuerza electromotriz, las cuales darán origen a corrientes parásitas o corrientes de Foucault. La circulación de estas corrientes, afectarán negativamente al funcionamiento de nuestro transformador provocando pérdidas de potencia activa o perdidas de Foucault, como muestra la siguiente formula:

$$P_{Fo} = 3R_{Fe}I_{Fo}^2 = 3\frac{U_{Fo}^2}{R_{Fe}}$$

Los arrollamientos o devanados, son los encargados de tomar la energía eléctrica del sistema eléctrico primario y entregársela al secundario. Los conductores suelen ser fabricados con sección circular, aunque también los podemos encontrar con sección cuadrada. Y suelen ser de materiales como cobre o aluminio.

Estos conductores que forman los arrollamientos, están aislados entre sí y respecto al resto de partes metálicas del transformador como el núcleo o la cuba en la que se encuentra, las cuales se conectan a tierra. Los materiales aislantes más utilizados entre los arrollamientos son barnices y papel. El barniz se suele usar en transformadores de baja potencia y tensión y en transformadores se prefiere usar láminas de papel dispuestas entre los conductores.

Los arrollamientos, pueden estar dispuestos por el núcleo magnético de diferentes formas según el núcleo, núcleo de columnas (figura 2.2) en la que los arrollamientos son cilindros concéntricos, o transformadores de núcleo acorazado (figura 2.3) en los que los arrollamientos están dispuestos en forma rectangular en diferentes galletas paralelas. En la siguiente imagen podemos ver, estas dos disposiciones:

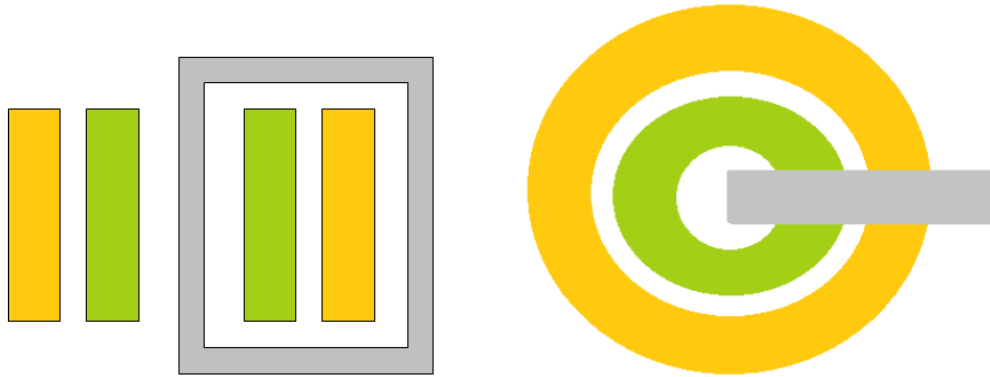


Figura 2.2 : Representación esquemática de los arrollamientos en un núcleo de columnas.

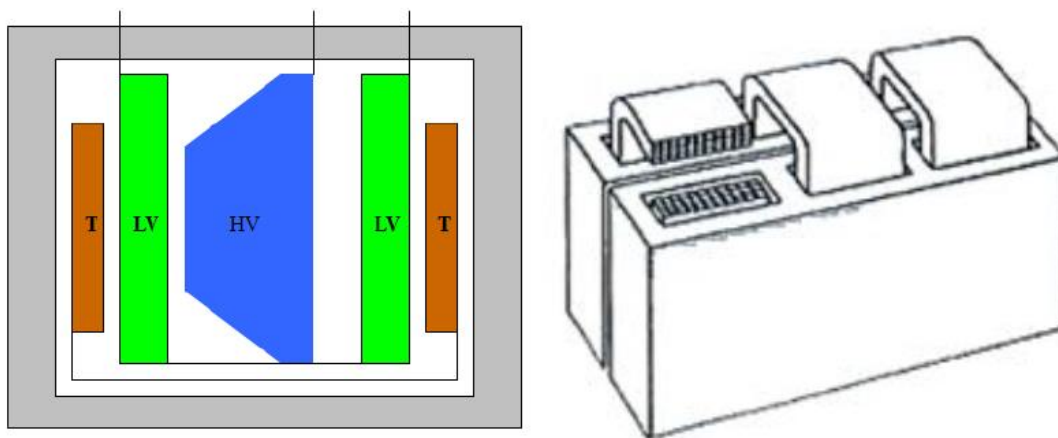


Figura 2.3 : Representación esquemática de los arrollamientos en un núcleo acorazado.

Al igual que en el núcleo al circular el flujo magnético se creaban unas pérdidas, por los arrollamientos al circular la corriente se producen pérdidas de potencia activa debidas al efecto Joule, como muestra la siguiente fórmula:

$$P_J = RI^2 = \rho \frac{l}{s} I^2 = \rho \delta^2 V_{cu}$$

## 2.3 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

Para lograr esta transformación de un sistema eléctrico a otro, transforma la energía eléctrica que le llega al devanado de entrada, en energía magnética, para volver a transformarla en electricidad, en las condiciones deseadas, en el devanado secundario. Por tanto, su principio de funcionamiento, podríamos decir que se basa en el fenómeno de la inducción electromagnética.

En un principio la corriente eléctrica circula por el primario, al llegar al devanado primario, producirá una fuerza magnetomotriz, la encargada de crear un flujo magnético  $\phi$ . Este flujo magnético circulará por el núcleo hasta el devanado secundario, donde producirá de manera contraria que, en el primario, una fuerza electromotriz en el secundario. Y, por tanto, una corriente que circulara por el sistema eléctrico secundario.

Esta fuerza electromotriz podría ser determinada mediante:

$$u_1 = e_1 = N_1 \frac{d\phi}{dt}$$

De valor de tensión eficaz:

$$U_1 = E_1 = 4.44fN_1\phi_1$$

Y de igual manera para el secundario.

Por tanto, los valores de las fuerzas electromotrices inducidas en el primario y en el secundario tienen como relación el número de espiras de sus arrollamientos respectivamente. Este cociente, es la denominada relación de transformación, y es el cociente entre el número de espiras del arrollamiento de mayor tensión entre el número de espiras del arrollamiento de menor tensión.

$$r_t = \frac{N_1}{N_2} > 1$$

## 2.4 FUNCIONAMIENTO EN VACÍO DE TRANSFORMADORES

Podemos definir como funcionamiento en vacío de un transformador, cuando uno de los arrollamientos, en nuestro caso el primario, estará conectado a una fuente de tensión y a un circuito eléctrico y el otro arrollamiento, el secundario se queda en circuito abierto, sin ninguna carga conectada en él.

Si para simplificar suponemos que todo el flujo que crea el primario llega al secundario, suponiendo que la resistencia de los arrollamientos es nula, podemos decir que la tensión aplicada en el primario es igual a la fuerza electro-motriz, siendo:

$$u_1 = \sqrt{2}U_{1N}\text{sen}\omega t$$

$$e_1 = \sqrt{2}U_{1N}\text{sen}\omega t$$

$$e_1 = u_1$$

Posteriormente, conociendo ya la fuerza electro-motriz, podremos obtener el valor del flujo engendrado por el primer arrollamiento, aplicando la Ley de Faraday, del siguiente modo:

$$e_1 = +N_1 \frac{d\phi}{dt}$$

$$\phi = \int \frac{1}{N_1} e_1 dt$$

$$\Phi = \int \frac{1}{N_1} \sqrt{2}U \text{sen}\omega t dt \rightarrow \Phi = \frac{-\sqrt{2}U}{N_1\omega} \cos \omega t$$

Una vez conocido el flujo del circuito magnético, del mismo método, pues hemos supuesto que la resistencia de los arrollamientos era nula y por tanto el flujo el mismo en el primario y el secundario. Podremos conocer la fuerza electro-motriz generada en el secundario:

$$e_2 = +N_2 \frac{d\phi}{dt}$$

Y, por tanto, la tensión en bornes del secundario será igual al valor de la fuerza electro-motriz del secundario. Esta tensión del secundario y la del primario, serán dos sinusoides en fase de la misma frecuencia, pero diferente valor eficaz, siguiendo la relación de transformación que habíamos comentado en el apartado anterior.

Una vez conocidos el flujo, las fuerzas electro-motrices y las tensiones de los dos arrollamientos, nos queda por conocer la corriente que consume el primario del transformador (pues el secundario al estar en circuito abierto, por él no circulará ninguna corriente), la cual, según la *Ley de Ampere*, es la que genera dicho flujo magnético.

Para ello, podemos hacer relación a la curva magnetizante de la chapa magnética del transformador, la curva B-H (como podemos ver en la figura 2.4). Curva que nos muestra el flujo en función de la inducción magnética precisa, que eso es proporcional a la intensidad necesaria para crear dicho flujo. Mediante las siguientes fórmulas podremos obtener y despejar dicha intensidad.

$$B = \frac{\phi}{S_{Fe}}$$

$$H = \frac{N_1 i_0}{l_{Fe}}$$



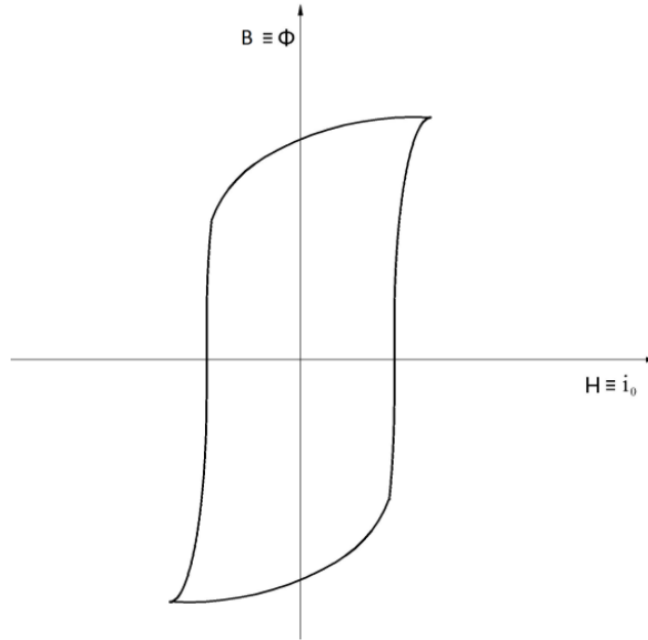


Figura 2.4 : Representación de la curva magnetizante.

Finalmente, una vez obtenida la intensidad de vacío en cada instante de tiempo podremos observar, que esta intensidad no es sinusoidal, y que cuando esta es cero, el flujo no es nulo debido a la histéresis, pese a que el máximo flujo sí que lo encontraremos cuando esta intensidad de vacío sea máxima. Como podemos ver en la siguiente figura.

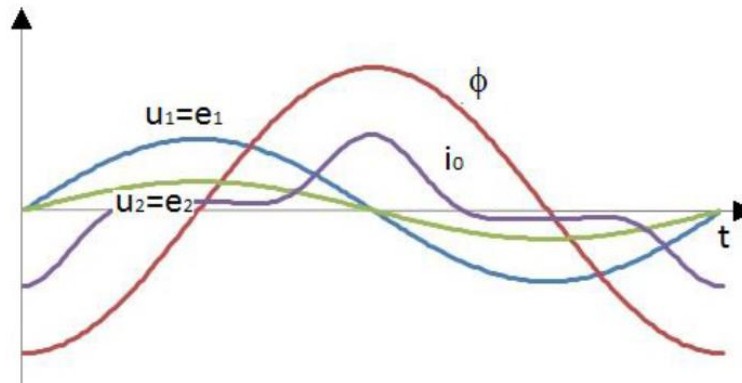


Figura 2.5 : Representación de todos parámetros del transformador en función del tiempo.

## 2.5 PÉRDIDAS EN EL HIERRO DE UN TRANSFORMADOR

Como se ha comentado en los apartados anteriores, en los transformadores de potencia, existen dos tipos de pérdidas, las pérdidas en el hierro a las que haremos referencia en este apartado y las pérdidas en el cobre de los arrollamientos del transformador.

Las pérdidas en el hierro de los transformadores ocurren por diferentes circunstancias mediante las cuales se ocasionan una serie de pérdidas de potencia activa, pues ninguna máquina eléctrica es ideal 100%.

Las pérdidas en el hierro se pueden diferenciar por la circunstancia que las ocasiona, que son las siguientes:

- Pérdidas por ciclos de histéresis.
- Pérdidas por corrientes parásitas o pérdidas de Foucault.

La histéresis es un fenómeno que se produce en los materiales ferromagnéticos cuando su imantación no solo depende del flujo magnético, sino también del estado de los materiales magnéticos que formen el transformador en este caso.

En el caso de los transformadores, según crece el flujo magnético, la imantación de estos materiales aumenta, pero cuando este flujo magnético cesa, la imantación se mantiene. Como se podía ver en la figura 2.4 del apartado anterior, y sabiendo que la corriente aplicada en el transformador es alterna, con lo que invierte constantemente su signo, variará de igual modo el sentido del campo magnético y, por tanto, el material que forman el núcleo magnético deberá de invertir su polaridad de igual modo ocasionando las pérdidas de energía. Estas pérdidas de energía se manifiestan en forma de calor en los núcleos magnéticos del transformador.

Las pérdidas por corrientes parásitas se producen en todos los materiales conductores, siempre que estos son sometidos a un flujo magnético variable.

En los transformadores, como el núcleo de los mismos son grandes conductores y son materiales magnéticos, se genera una fuerza electromotriz inducida que es la que origina las corrientes. Las circulaciones de estas corrientes de Foucault crean electroimanes con campos magnéticos opuestos al campo magnético aplicado, dando lugar al denominado *efecto Joule*.

El efecto Joule, es un fenómeno originado cuando por un conductor circula corriente eléctrica y parte de la energía cinética de los electrones en movimiento se transforma en calor debido a los choques de estos electrones con el material conductor, ocasionando pérdidas de energía en forma de calor.

Las pérdidas por corrientes parásitas dependerán, por tanto, del material con el que esté fabricado el núcleo magnético del transformador.

Para reducir estas pérdidas de potencia los núcleos de los transformadores son fabricados mediante chapas magnéticas de espesores muy delgados, una encima de otra y aisladas entre sí. De esta manera, la corriente eléctrica se mantiene en cada chapa induciendo menor corriente y generando, por tanto, menos pérdidas parásitas.

## CAPÍTULO 3

### CORTE DE CORRIENTES EN UN DISYUNTOR

Un disyuntor es un interruptor automático capaz de interrumpir y establecer corrientes en vacío, normales de servicio y anormales, ya sean sobrecorrientes que hayan excedido un determinado valor o en casos de cortocircuitos, para así proteger los diferentes equipos eléctricos conectados en el sistema. Además, vuelven a ponerse en funcionamiento sin necesidad de reemplazarlos, como sería el caso de los fusibles, por eso podemos decir que son capaces de establecer corrientes.

Los interruptores automáticos tienen una serie de características y parámetros que deben de ser especificados según la red o el sistema en el que se instalen. Estos parámetros son los siguientes:

- **Frecuencia asignada.** Frecuencia nominal de la red.
- **Tensión asignada.** Tensión máxima que puede darse en la instalación en condiciones normales, la cual debe de ser capaz de soportar en interruptor.
- **Corriente asignada.** Corriente que el interruptor puede soportar durante un tiempo indefinidamente largo en condiciones normales.
- **Nivel de aislamiento.** Aptitudes del interruptor para soportar las sobretensiones a frecuencia industrial, las sobretensiones tipo rayo y las sobretensiones tipo maniobra.
- **Tensión transitoria de Restablecimiento (TTR).** Tensión máxima que el interruptor es capaz de soportar entre sus contactos durante el transitorio de corte de corriente.
- **Poder de corte ( $I_d$ ).** Corriente máxima en valor eficaz que puede cortar el interruptor con total seguridad, con una tensión próxima a la nominal.
- **Poder de cierre nominal.** Valor instantáneo máximo que puede alcanzar la corriente de cortocircuito en el momento del cierre de un disyuntor con todas las garantías de seguridad.
- **Secuencia de maniobras asignada.** Tiene relación con la posibilidad de reenganche o no del interruptor después de una falta.
- **Corriente de corta duración admisible.** Valor máximo de corriente que puede soportar el aparato durante un tiempo especificado (debe ser compatible con la corriente asignada y con el poder de corte).
- **Intensidad límite térmica.** Valor máximo de corriente a partir del cual los esfuerzos térmicos adicionales ocasionados en el aparato no resultan admisibles para el mismo.
- **Duración de cortocircuito.** Habitualmente 1s.
- **Intensidad límite dinámica.** Valor máximo de corriente a partir del cual los esfuerzos electrodinámicos ocasionados en el aparato no resultan admisibles para el mismo.

### 3.1 TIPOS DE INTERRUPTORES

Podemos clasificar los interruptores automáticos según el medio de extinción de la corriente pudiendo diferenciar:

- **Interruptores con ruptura en el aire.**

Estos interruptores disparan un chorro de aire con gran fuerza contra el arco eléctrico barriéndolo totalmente.

Ventajas:

- Bajo costo y disponibilidad de aire.
- Rapidez de ruptura.
- Aumento de la capacidad de ruptura en función de la presión del aire.
- Alta capacidad de ruptura.
- Operación rápida (alrededor de 4 ciclos).
- Fácil acceso a los contactos.

Desventajas:

- Menor rigidez dieléctrica que el SF6.
- Mayor presión de trabajo.
- Construcción compleja, debido al aire comprimido.
- Mayor costo.

Este tipo de interruptores tiene un bajo poder de corte y se emplean fundamentalmente en baja tensión.

- **Interruptores con ruptura en aceite.**

Al saltar un arco eléctrico entre los contactos se eleva la temperatura de la cámara, gasificando así el propio aceite, provocando unas turbulencias en el aceite y bañando los mismos contactos e interrumpiendo así el arco.

Ventajas:

- Menor separación entre contactos.
- Mejor aislamiento entre piezas en tensión y masa.
- Construcción sencilla.
- Alta capacidad de ruptura.

Desventajas:

- Riesgo de inflamabilidad del aceite.
- Posibilidad de explosión debida al gas.
- Mantenimiento del aceite.

Este tipo de interruptores fueron muy utilizados durante muchos años, pero hoy han caído en desuso y prácticamente no se utilizan.

- **Interruptores con ruptura en el vacío.**

El vacío presenta una alta rigidez dieléctrica, por ello, es tan efectivo como método de ruptura, ya que, al producirse el arco entre los contactos en su apertura, suele extinguirse en su primer paso por cero o incluso antes. En ellos, el arco no puede formarse por el gas ionizado pues se encuentra en vacío, pero se consigue formar por metal vaporizado de los electrodos al alcanzar tan altas temperaturas.

Ventajas:

- Aislamiento e interrupción garantizado debido a la alta rigidez dieléctrica del vacío.
- Rápida extinción del arco (15 milisegundos).
- Poco pesados y baratos.
- Poco mantenimiento y mayor vida útil.

Desventajas:

- Capacidad de interrupción limitada.

Este tipo de interruptores se emplea en instalaciones de MT hasta 50 kV.

- **Interruptores con ruptura en hexafluoruro de azufre ( $\text{SF}_6$ ).**

Cuando se detecta la falta los contactos empiezan a abrirse, en ese momento un pistón comienza a comprimir el gas  $\text{SF}_6$  a la vez que se comienza a formar un arco entre los contactos del interruptor. Es entonces cuando se inyecta una pequeña cantidad de este gas al arco, disminuyendo así su corriente y enfriándose, hasta terminar de extinguirlo.

Ventajas:

- Tensión del arco baja.
- Poco mantenimiento y gran vida útil.
- Alta rigidez dieléctrica que hace que sea un excelente aislante.

Desventajas:

- Gas inflamable.

Este tipo de interruptores son los más utilizados hoy en día, y cubren una gama amplia de tensiones, desde la media tensión hasta la muy alta tensión.

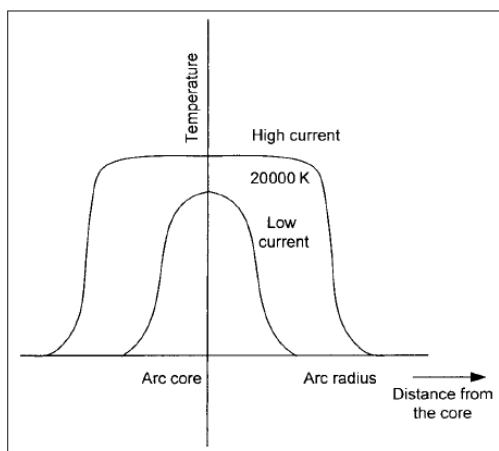
### 3.2 INTERRUPCIÓN DE CORRIENTE EN UN INTERRUPTOR

Cuando se da la orden de abrir a un interruptor automático los contactos del mismo comienzan a separarse. Al comenzar a moverse los contactos del interruptor o disyuntor, comienza a disminuir poco a poco la superficie de contacto entre los electrodos, lo que, a su vez, aumenta la densidad de corriente y la temperatura de los contactos. El campo eléctrico que se establece entre los contactos desde el instante en el que comienzan a separarse, acelera los iones del medio. Es entonces cuando el gas del medio en el que se encuentran se comienza a ionizar, debido al choque de los electrones emitidos por el cátodo con las moléculas de gas.

El arco eléctrico es una descarga continuada entre los contactos cuando son separados ligeramente, por donde pasa la corriente al hacerse conductor el medio en el que se encuentran. Dándose un gran desprendimiento de luz y calor.

La composición del arco eléctrico depende del tipo de interruptor, en interruptores de vacío el arco eléctrico está formado por vapores del metal de los electrodos, mientras que en interruptores de SF<sub>6</sub> el arco eléctrico está formado por plasma, compuesto por iones y electrones a elevadas temperaturas.

Los arcos de elevadas corrientes están formados por un núcleo central de plasma a una temperatura muy elevada, próxima a los 20.000 grados, que se reduce de forma rápida en el extremo del arco (figura 3.1) [Das10]. La temperatura de este núcleo central es aproximadamente constante. Por el contrario, los arcos de bajas corrientes no disponen de un núcleo central de una temperatura constante (figura 3.1). Cuando la intensidad del arco es muy baja el arco eléctrico es inestable y se pueden producir apagados y reencendidos del arco.



*Figura 3.1 : Distribución de la temperatura del arco para el caso de arcos de elevadas corrientes y arcos de bajas corrientes [DAS10].*

Por ello uno de los métodos de los interruptores es enfriar dicho arco o los propios electrodos, reduciendo así el diámetro del arco hasta que la temperatura es tan baja que el arco es inestable y se extingue. Normalmente, los arcos eléctricos se extinguen en el paso por cero de la corriente, pudiendo extinguirse antes del paso por cero en algunos casos a baja corriente en los que la temperatura es mucho más baja.

La caída de tensión en el arco eléctrico depende de la intensidad, de modo que cuanto menor sea la intensidad la caída de tensión será mayor pues el gas del medio está más frío y menos ionizado, por tanto, y por el contrario cuanto más caliente este el arco, a mayor corriente, la caída de tensión entre contactos es menor.

La caída de tensión depende de otros factores tales como la temperatura, la presión, el medio en el que se dé el arco, pues se comportará de diferente manera en función del medio en el que se encuentre, en un disyuntor en aire, con aire ionizado o en un disyuntor en vacío, con partículas metálicas vaporizadas de los contactos y del material de los contactos.

El arco eléctrico lo trataremos como una resistencia, por ello la caída de tensión dependerá de la corriente (figura 3.2).

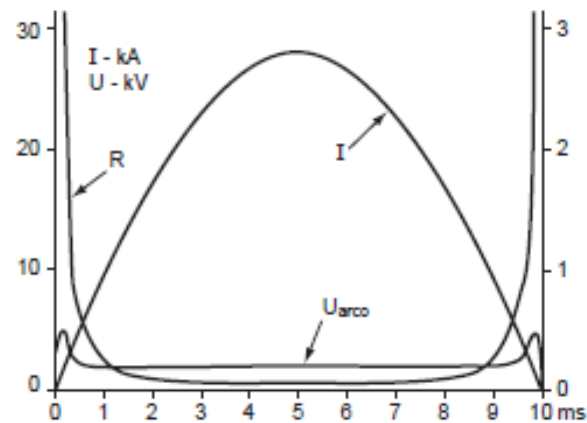


Figura 3.2 : Resistencia y caída de tensión en el arco, en función de la corriente del mismo.



### 3.3 TENSIÓN TRANSITORIA DE RESTABLECIMIENTO (TTR)

La tensión transitoria de restablecimiento (TTR o TRV) es la tensión entre los electrodos inmediatamente posterior al apagado del arco eléctrico. Es importante conocer con precisión su valor, para saber así, si el arco puede cebarse de nuevo o no. Esta tensión la habíamos mencionado con anterioridad como una de las magnitudes precisas para seleccionar un disyuntor como la tensión máxima que el interruptor es capaz de soportar entre sus contactos inmediatamente después del transitorio de corte de corriente.

Para su estudio real, es necesario considerar las inductancias y las capacidades parásitas (figura 3.3), existiendo entonces un régimen transitorio oscilante, en el que las sobretensiones pueden ser mayores.

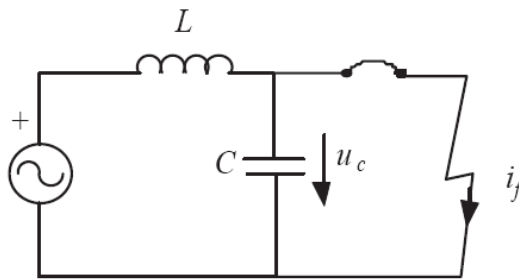


Figura 3.3 : Caso más habitual de línea inductiva con capacidades parásitas.

La inductancia de la red es muy superior a la resistencia interna, de forma que en régimen permanente de cortocircuito el desfase entre tensión e intensidad es de  $90^\circ$ . Eso hace que la eliminación de la falta sea más difícil, pues la tensión transitoria de restablecimiento es mayor.

Mientras el interruptor esté cerrado la corriente en el condensador es nula y cuando el arco se extingue la tensión en el condensador empieza a crecer.

En el caso de que el interruptor actúe cuando la corriente de cortocircuito llega al régimen permanente, la corriente que hay que cortar es menor, pero la tensión transitoria de restablecimiento es mayor y hay más posibilidades de cebado y reencendido del arco, debido al desfase entre la tensión y la corriente (figura 3.4).

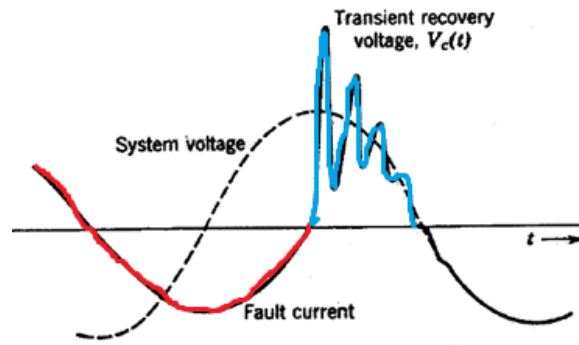


Figura 3.4 : Caso en el que el interruptor actúa cuando la corriente está en régimen permanente.

En el caso contrario si el interruptor abre sin que la corriente de cortocircuito llegue al régimen permanente, que sería lo más normal, estando aún en el transitorio, la corriente de cortocircuito a extinguir es mayor, pudiendo deteriorar los contactos del interruptor, pero la tensión transitoria de restablecimiento es menor y por tanto, menor posibilidad de reencendido del arco (figura 3.5).

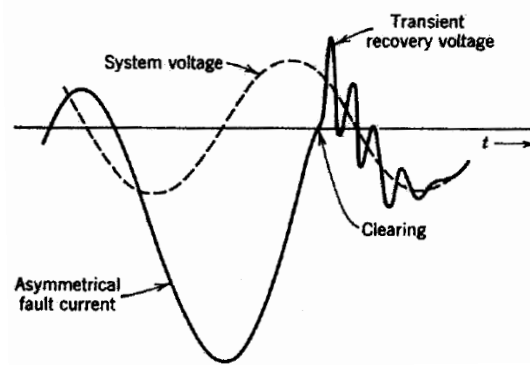


Figura 3.5 : Caso en el que el interruptor actúa cuando la corriente se encuentra aún en el transitorio.

### 3.4 EXTINCIÓN DE LA CORRIENTE EN UN CIRCUITO ELÉCTRICO

Cuando se da la orden de abrir a un interruptor automático los contactos del mismo comienzan a separarse. Sin embargo, aunque los contactos del interruptor se separen la corriente no se extingue, sino que se perpetúa a través del arco eléctrico. En el paso por cero de la corriente la corriente se extingue, pero el medio entre contactos se encuentra todavía caliente y en él existen portadores de carga que todavía no se han recombinado. Por eso si la tensión transitoria de restablecimiento es suficientemente elevada el arco eléctrico se vuelve a cebar (figura 3.6).

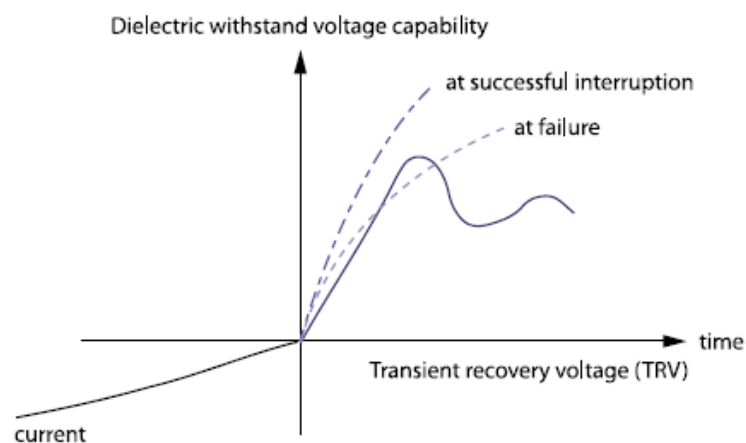


Figura 3.6 : Interrupción dieléctrica

En la figura 3.7 se muestra un ejemplo simple de lo dicho en el párrafo anterior para el caso de un circuito puramente resistivo.

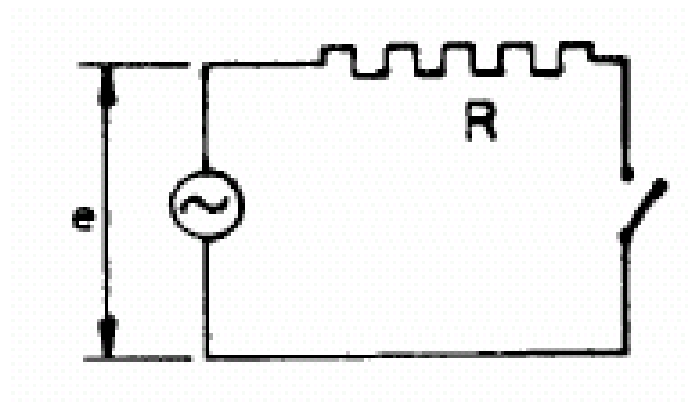


Figura 3.7 : Circuito puramente resistivo.

Si admitimos que la caída de tensión en el arco eléctrico es proporcional a la distancia de separación entre electrodos, y que estos se separan con una velocidad  $v$ , la ecuación del circuito es:

$$U\sqrt{2}\sin\omega t = Ri + u_b$$

$$U\sqrt{2}\sin\omega t = Ri + bvt$$

Con lo que:

$$i = \frac{U\sqrt{2}}{R}\sin\omega t \mp \frac{b}{R}vt$$

En la figura 3.8 se muestran los instantes de extinción de la corriente y los instantes de recobrado del arco entre contactos del interruptor.

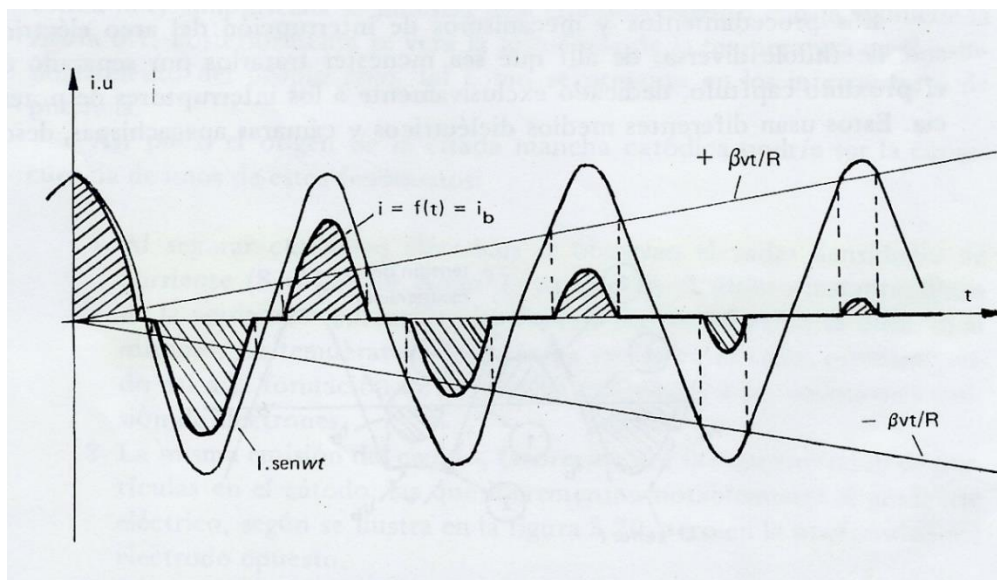


Figura 3.8 : Instantes de extinción de la corriente y los instantes de recobrado del arco entre contactos del interruptor.

Habitualmente el circuito queda definitivamente abierto en el segundo o tercer paso por cero de la corriente (duración de arco entre 10 y 30 ms).

Sin embargo, como se indicó en el apartado 3.2 un arco eléctrico que transporte una intensidad muy reducida tiene un núcleo interno de una temperatura muy baja, y por ello el arco es inestable y se puede extinguir antes del paso por cero de la corriente. Esto es lo que sucede en los interruptores de los transformadores cuando deben abrir con el transformador en vacío. El interruptor debe ser elegido para que sea capaz de cortar la corriente de cortocircuito del

transformador, que puede ser entre 8 y 10 veces la corriente nominal. Por ejemplo, en un transformador de 150 MVA el poder de corte del disyuntor debe ser de 2.700 A. Sin embargo, cuando el transformador está en vacío la corriente es inferior al 0,5% de la corriente nominal (en el ejemplo anterior la corriente de vacío es inferior a 2 A. Un disyuntor de 2.700 A es capaz de interrumpir una corriente de 2 A antes del paso natural por cero de la corriente, y eso produce sobretensiones en el transformador como se expondrá en el capítulo 5.

# CAPÍTULO 4

## EL PROGRAMA ATP

### 4.1 EL ATP

El ATP, *Alternative Transients Program*, es un programa informático utilizado para resolver problemas de circuitos eléctricos, principalmente en régimen transitorio. Este programa proviene del antiguo EMTP desarrollado a finales de la década de 1960 por Hermann W. Dommel, que ya en el año 1984 pasó a ser ATP desarrollado por Drs. W. Scott Meyer y Tsu-huei Liu.

Los trabajos que se realizan con el ATP, tratan de dar solución a diversos objetivos, como el diseño, aislamiento, dimensionamiento, coordinación y sistemas de control de equipos o resolver problemas de fallos en los sistemas y el estudio de análisis de transitorios del sistema.

El modelado del sistema a resolver puede ser realizado adicionalmente con un subprograma adicional, con el que trabajaremos también en este proyecto, denominado ATPDRAW, que nos permite armar los componentes del sistema de forma gráfica.

Este programa utiliza el método de integración trapezoidal [27] para resolver las ecuaciones diferenciales del sistema que trata de simular.

### 4.2 MODELOS DE TRANSFORMADOR

El programa ATP, ofrece diferentes modelos de transformadores, para el estudio de transitorios electromagnéticos, con los que poder realizar diferentes estudios según las necesidades de nuestro sistema con distinto nivel de detalle. En primer lugar, de todos los modelos de transformadores, podemos elegir si lo queremos de dos o de tres devanados. Entre ellos, podemos distinguir:

- Transformador Ideal

El modelo de transformador ideal es un modelo de transformador sin reactancia de dispersión ni pérdidas, esto es, sólo incluye una relación de transformación. ATP dispone de un modelo de transformador monofásico ideal y de un modelo de transformador trifásico ideal.

- Modelo Saturable.

El modelo del núcleo del transformador en ATP se basa en la curva característica que relaciona el valor de cresta de los enlaces de flujo ( $\lambda_{pico}$ ) frente a la corriente precisa para crearlos ( $I_{pico}$ ).

Este modelo considera la resistencia de los arrollamientos primario y secundario, así como la reactancia de dispersión, también incluye una resistencia que representa las pérdidas en el hierro pero no incluye un modelo detallado que tenga en cuenta el fenómeno de histéresis.

Este modelo en su entrada de datos, al incorporarlo en nuestro sistema en ATP, nos pide los valores de  $V_{rms}$  y  $I_{rms}$  de la prueba de vacío, pero al ejecutar el programa estos valores son pasados a valores pico. Este modelo considera sus elementos como desacoplados.

Este modelo es muy usado para transformadores monofásicos, sin embargo, no lo es tanto para transformadores trifásicos pues las inductancias saturables de las tres fases se unen en un punto común lo cual no es siempre la mejor solución, pues ello es cierto sólo para el arrollamiento más interno (más próximo al núcleo magnético).

- Modelo BCTRAN.

Este modelo surge precisamente para resolver las limitaciones que da el Modelo Saturable en transformadores trifásicos.

El modelo BCTRAN es una representación lineal simplificada de transformadores en forma de matrices de impedancias o admitancias en derivación, teniendo en cuenta los acoplamientos entre los devanados y las pérdidas de histéresis. Sin embargo, esta aproximación, también falla pues no puede realizar efectos no lineales del núcleo, a su vez, al realizar la saturación del transformador también dará error, debido a que en la prueba de vacío no se alcanza esta saturación completa. Para tener en cuenta la no linealidad se pueden incluir inductancias no lineales en paralelo con el lado del transformador más próximo al núcleo magnético.

El modelo admite los datos de la impedancia homopolar si están disponibles.

Puede usarse para transformadores de dos o tres arrollamientos. El modelo admite diferentes tipos de núcleos magnéticos tales como bancos de transformadores monofásicos, transformadores de tres columnas, transformadores de cinco columnas o transformadores acorazados. En el caso de transformadores con un arrollamiento en triángulo el tipo de núcleo magnético no es muy importante. Sin embargo, en el caso de que los arrollamientos del transformador estén en estrella, si el núcleo magnético es de columnas el flujo homopolar cierra su camino por la cuba. No obstante, este modelo no tiene en cuenta la saturación de la cuba ya que sólo permite especificar un punto de la curva de magnetización para el flujo homopolar.

El modelo no incluye las capacidades parásitas entre arrollamientos y entre éstos y tierra, por lo que sólo es válido para funcionamiento a baja frecuencia.

- Modelo Híbrido.

Este modelo llamado XFMR se añadió a la versión 4.2 de ATPDraw en junio de 2005. El modelo surgió para mejorar aún más el modelo anterior el BCTRAN. El modelo permite considerar diferentes tipos de núcleos magnéticos, tales como bancos de transformadores monofásicos, transformadores de tres columnas, transformadores de cinco columnas y dos tipos de núcleos

magnéticos para transformadores acorazados. Incluso permite considerar el orden de sucesión de los arrollamientos contados a partir del núcleo magnético.

Entre algunas de las mejoras del modelo cabe destacar:

- Usa resistencias de devanados dependientes de la frecuencia para tener en cuenta el efecto pelicular.
- Usa una representación correcta de la no linealidad del núcleo basada en la curva de Frolich.

$$B = \frac{H}{a + b \cdot H}$$

Con a y b constantes.

No obstante, como el ajuste de esta curva a los materiales modernos es poco satisfactorio, el programa permite al usuario elegir la siguiente expresión alternativa:

$$B = \frac{H}{a + b \cdot H + c \cdot \sqrt{H}} + \mu_0 \cdot H$$

- Incluye la dependencia de las pérdidas en el hierro con la frecuencia, utilizando una expresión del tipo

$$p_{Fe} = \left(\frac{f}{50}\right)^{1,5} (d \cdot B^2 + e \cdot B^{10})$$

- Incluye efectos capacitivos entre arrollamientos y entre arrollamientos y tierra.
- Incorpora acoplamientos capacitivos entre los arrollamientos de AT de las diferentes fases.

Entre los datos que podemos incluir en este modelo de transformador, cabe destacar:

- Número de bobinados.
- Tipo de núcleo.
- Frecuencia.
- Datos de inductancias, resistencias y capacitancias obtenidos de protocolos de ensayos, de datos del fabricante o de valores típicos.
- Datos de tensión y potencia en los tres devanados y la forma de sus conexiones.
- Seleccionar que datos queremos que sean resultados del informe y cuales son datos de diseño.

En el caso de que se elija la introducción de resistencias, capacidades o inductancias a partir de datos de diseño el modelo calcula automáticamente la impedancia en cuestión a partir de datos tales como diámetro del núcleo, número de espiras, anchura de los arrollamientos, separación entre los mismos, etc.

El modelo utiliza un modelo topológico del núcleo basado en la dualidad existente entre circuitos magnéticos y circuitos eléctricos. De esta forma el circuito magnético es representado como un



circuito eléctrico. Este modelo topológico es unido al modelo de los arrollamientos para obtener la corriente de magnetización de cada fase.

La figura 4.1 muestra el circuito equivalente del transformador híbrido. En rojo se muestran las capacidades parásitas entre arrollamientos, entre arrollamientos y tierra y entre AT y BT, en naranja se muestran las resistencias de los arrollamientos, dependientes de la frecuencia, En azul se muestran las inductancias de dispersión, y en verde se muestra el circuito eléctrico dual del circuito magnético.

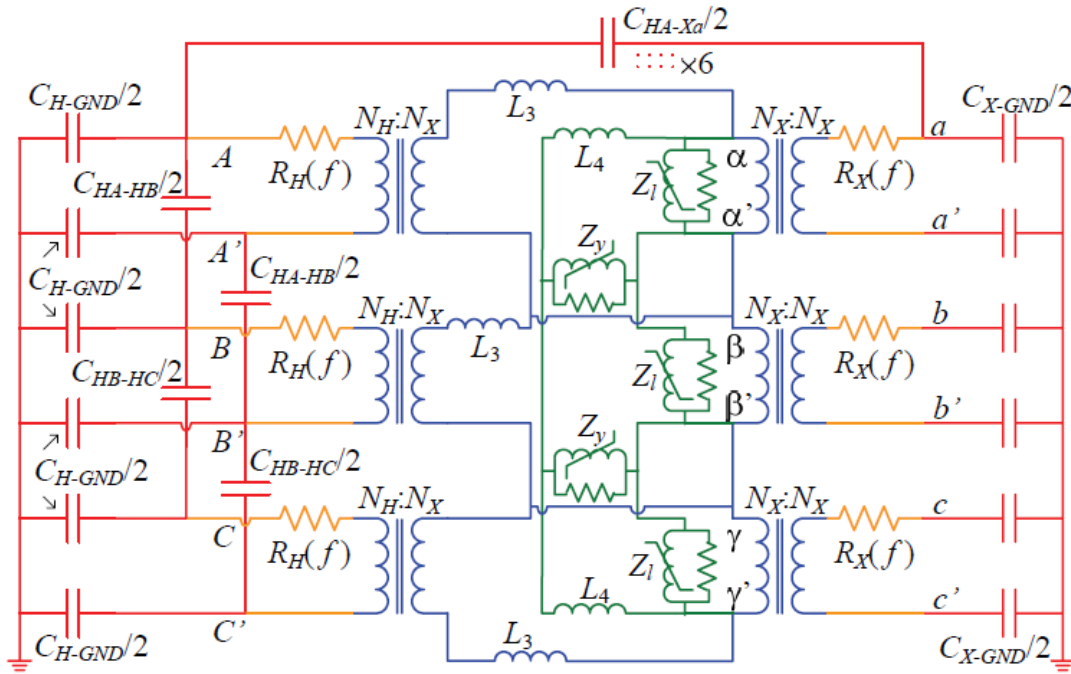


Figura 4.1 : Circuito equivalente del transformador híbrido.

Las inductancias de dispersión son consideradas a través de una matriz de inductancias.

Este será el modelo que nosotros usaremos en el desarrollo de nuestro proyecto.

## CAPÍTULO 5

# SOBRETENSIONES DEBIDAS AL CORTE DE PEQUEÑAS CORRIENTES INDUCTIVAS

### 5.1 INTRODUCCIÓN

La apertura de un transformador en vacío puede acarrear sobretensiones de magnitudes importantes como para estudiarlas debido a los problemas que pudieran acarrear en los transformadores. En el presente capítulo se analizan dichas sobretensiones.

### 5.2 TRANSITORIO DE DESCONEXIÓN DE UN TRANSFORMADOR SIN PÉRDIDAS EN VACÍO

El origen de las sobretensiones en la desconexión de un circuito, se debe fundamentalmente al corte de corrientes antes de su paso natural por cero, pues el poder de corte del disyuntor es superior al nivel de la corriente interrumpida. A pesar de ello, aun cuando el disyuntor consigue cortar la corriente en su paso por cero, aparece una tensión transitoria de restablecimiento del orden de dos veces mayor que el valor de cresta de la tensión nominal.

En un transformador existen unas capacidades parásitas entre sus arrollamientos y tierra, estas capacidades parásitas en la desconexión del transformador quedarán cargadas a un valor de tensión, y darán un proceso oscilatorio de carga y descarga con las inductancias magnetizantes del transformador.

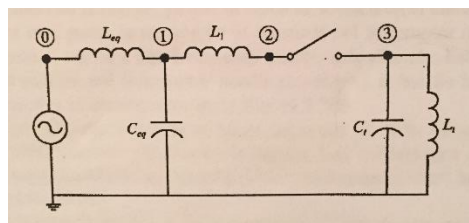


Figura 5.1 : Circuito equivalente del transformador.

La corriente que circula por las bobinas del transformador representa la energía magnética almacenada por las bobinas y esta energía no puede reducirse a cero en un tiempo infinitesimal según se desconecta el transformador. Por tanto, esta energía magnética almacenada se evacuará a través de las capacidades parásitas, convirtiéndose en energía electrostática almacenada en las capacidades, estableciéndose el circuito oscilatorio de carga y descarga.

### 5.2.1 TRANSITORIO EN EL CASO DE QUE LA APERTURA DEL CIRCUITO SE PRODUZCA EN EL PASO POR CERO DE LA CORRIENTE

En el caso de que la desconexión se dé en el paso por cero, la capacidad queda cargada en un valor de pico muy próximo a la tensión máxima de alimentación mientras que la inductancia quedará descargada y será entonces cuando se dé la descarga de la capacidad, alimentando la inductancia produciéndose así el proceso oscilatorio no amortiguado, cuya frecuencia es:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{\mu}C}}$$

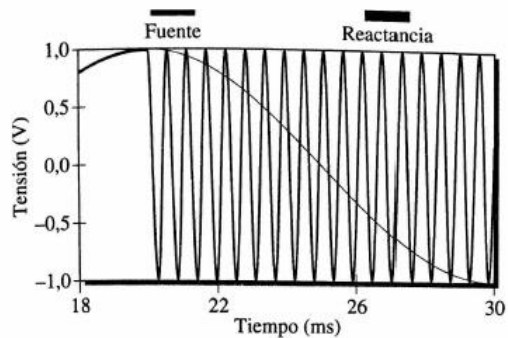
Siendo  $L_{\mu}$  el valor de la inductancia magnetizante y  $C$  la capacidad parásita a tierra. Esta frecuencia será siempre mucho más elevada que la frecuencia de operación de la red.

El análisis de un proceso transitorio como este, se puede realizar mediante un balance de energía.

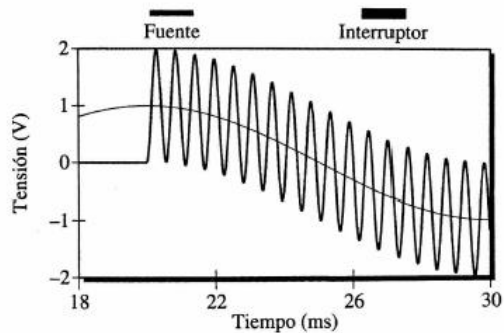
En el caso en el que el disyuntor corte la corriente justa en su paso natural por cero, la tensión máxima en bornas del transformador y la corriente máxima se puede relacionar, igualando la energía máxima que se almacenará en la inductancia magnetizante y la energía que ha quedado en la capacidad, justo tras el corte.

$$\frac{1}{2} L_{\mu} I_{\max}^2 = \frac{1}{2} C_{HV} U_{\max}^2$$

Este efecto lo podemos observar en la figura 5.2.



a) Tensiones en la fuente y en la reactancia



b) Tensión transitoria de restablecimiento

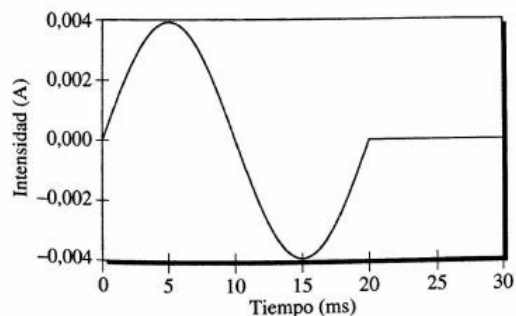


Figura 5.2 : Representación durante el corte de una pequeña corriente inductiva en el paso por cero.

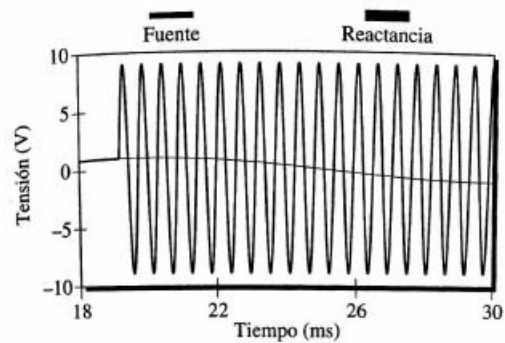
### 5.2.2 TRANSITORIO EN CASO DE QUE SE PRODUZCA ARRANQUE DE CORRIENTE

En el caso contrario, cuando la corriente no es cortada tras su paso por cero, como ya hemos dicho la tensión transitoria de restablecimiento sería de una magnitud bastante mayor al máximo de la tensión nominal del circuito y por ello será mucho más peligroso para sus aislamientos. Seguirán apareciendo oscilaciones no amortiguadas y la frecuencia será la misma. Como podemos ver en la figura 5.3.

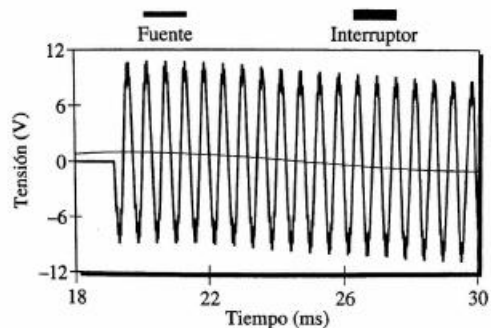
Los valores de tensión y corriente máxima, los obtendremos de nuevo con un balance de energía, pues la energía almacenada en el momento previo al corte debe de ser igual a la energía almacenada en las capacidades posterior al corte.

$$W = \frac{1}{2} L_{\mu} I_0^2 + \frac{1}{2} C_{HV} U^2 = \frac{1}{2} C_{HV} U_{\max}^2$$

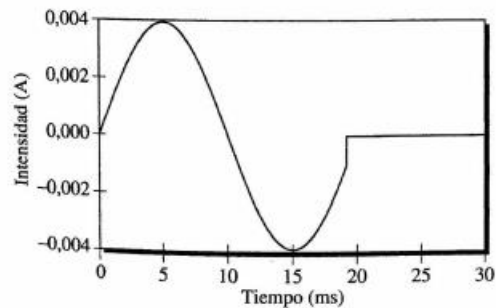
$$U_{\max} = \sqrt{U_0^2 + \frac{L_t}{C_t} I_0^2}$$



a) Tensiones en la fuente y en la reactancia



b) Tensión transitoria de restablecimiento



c) Intensidad de corriente en el interruptor

Figura 5.3 : Representación durante el corte de una pequeña corriente inductiva antes del paso por cero.

### 5.3 CASO DE CEBADO DEL ARCO EN EL INTERRUPTOR

En cualquiera de los casos, en transformadores en vacío, si la tensión transitoria de restablecimiento es mayor que la rigidez dieléctrica del medio de corte del disyuntor, el arco se cebaría nuevamente. Ya que con corrientes elevadas el arco es más estable y además las oscilaciones se amortiguan muy pronto.

## CAPÍTULO 6

### SIMULACIONES REALIZADAS

En las siguientes simulaciones que mostraremos a continuación, hemos tratado de simular en el programa ATP, *Alternative Transients Program*, cinco modelos de transformadores reales. En ellos, simularemos la desconexión de estos transformadores en vacío, en diferentes instantes de tiempo, además modificaremos diferentes aspectos de estos transformadores y de la línea que los alimenta, para así poder observar los diferentes resultados que ocasionan estas variaciones.

En primer lugar, presentamos los datos de los transformadores con los que trabajaremos. Que como podemos observar en la siguiente tabla, tenemos cinco modelos de transformadores de diferentes potencias, desde un transformador pequeño como puede ser un transformador de 15 MVA, hasta transformadores más grandes de hasta 150 MVA.

Trafo	Potencia (MVA)	U1N (kV)	U1fn (kV)	U2N (kV)	U2fn (kV)	IN1 (A)	IO (%)	Io (A)	Ife (A)	Im (A)	Pfe (W)
T1	15	45	25,98	16,05	9,266	577	0,3	1,56	0,00385	1,56	100
T2	25	45	25,98	16,05	9,266	962	0,1	0,87	0,00385	0,87	100
T3	75	220	127	71	40,99	590	0,1	0,47	0,00079	0,47	100
T4	40	220	127	21,5	12,41	315	0,1	0,28	0,00079	0,28	100
T5	150	230	132,8	71	40,99	1130	0,1	0,68	0,00075	0,68	100

Tabla 3: Datos de los cinco modelos de transformadores con los que trabajaremos.

Y los datos impedancias que corresponderan, de dichos transformadores a los circuitos de parámetros concentrados:

Trafo	Rfe ( $\Omega$ )	Lm (H)	CH (nF)	CL (nF)	CHL (nF)
T1	41,2	53	3,01	1,375	6,353
T2	133	95,5	3,18	0,98	7,53
T3	448	856	4,51	2,1	7,83
T4	1245	1426	3,39	9,97	3,27
T5	218	624	4,58	12,89	6,79

Tabla 4: Datos de las impedancias de los mismos transformadores con los que trabajaremos.

Para realizar las simulaciones primeramente modelaremos el transformador a partir de elementos discretos (resistencias, bobinas y condensadores) y posteriormente sustituiremos los elementos discretos R y L por el modelo BCTRAN que proporciona ATPDraw, no obstante, mantendremos el condensador ya que el modelo BCTRAN no lo incluye.

Como hemos comentado anteriormente, de cada uno de estos transformadores modificaremos diferentes aspectos como los siguientes:

- Instantes de corte.
- Pérdidas en el hierro.
- Valor de la corriente interrumpida.
- Valores de las capacidades.

Tras modificar estos aspectos en los diferentes transformadores, estudiaremos entre otras las siguientes características:

- Frecuencia natural.
- Valor de cresta de la tensión.
- Pérdidas en el cobre.

## 6.1 DIFERENCIAS ENTRE LA SIMULACION POR ELEMENTOS DISCRETOS FRENTE A LA SIMULACION CON BCTRAN

Vamos a comparar los resultados de simulación modelando el transformador a partir de elementos discretos con los resultados obtenidos modelando el transformador a través del modelo BCTRAN.

### 6.1.1 MODELADO A PARTIR DE ELEMENTOS DISCRETOS

En primer lugar, hemos modelado el transformador considerándolo lineal y con unas pérdidas en el hierro muy reducidas, mediante elementos discretos, que consta de una rama RL y una rama RC en paralelo conectados a una línea, como podemos ver, en la figura:

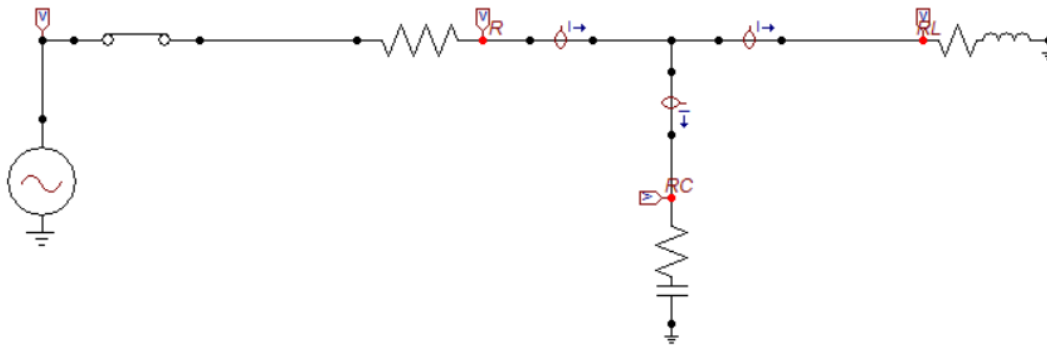


Figura 6.1-1 : Esquema modelado mediante elementos discretos.



En cuanto a los valores de los diferentes elementos hemos de comentar que, para los valores de R, en los primeros casos simularemos los diferentes modelos con unos valores de R de línea muy pequeños entre  $0.001 \Omega$ , para así no tener prácticamente pérdidas en el cobre, a pesar de que será uno de los aspectos que más adelante estudiaremos, del mismo modo, el valor de la R de la rama RC tendrá un valor muy pequeño tal como  $0.01 \Omega$ . En la rama RL, R tendrá el valor que le corresponda a dicho transformador, semejante al transformador que representa como elementos discretos. Los valores del condensador han sido tomados directamente como dato real de los transformadores con los que trabajaremos. Sin embargo, el valor de la inductancia ha sido calculado sencillamente de la siguiente forma:

$$X_{\mu} = \frac{U_{fn}}{I_{\mu}} \quad ; \quad L = \frac{X_{\mu}}{2\pi}$$

### 6.1.2 MODELADO MEDIANTE TRANSFORMADOR BCTRAN

Tras haber modelado el transformador mediante elementos discretos y puesto que el programa ATPDraw dispone de un elemento que directamente simula un transformador, tratamos de comprobar que los resultados obtenidos serán similares y más exactos quizá mediante el BCTRAN. Pero este modelo como ya se explicó con anterioridad, no incorpora las capacitancias en paralelo a tierra del transformador, por tanto, respecto al modelado mediante elementos discretos físicamente solo observaremos que se ha eliminado la rama RL y se ha sustituido por el modelo BCTRAN del programa. Como podemos ver en la siguiente figura:

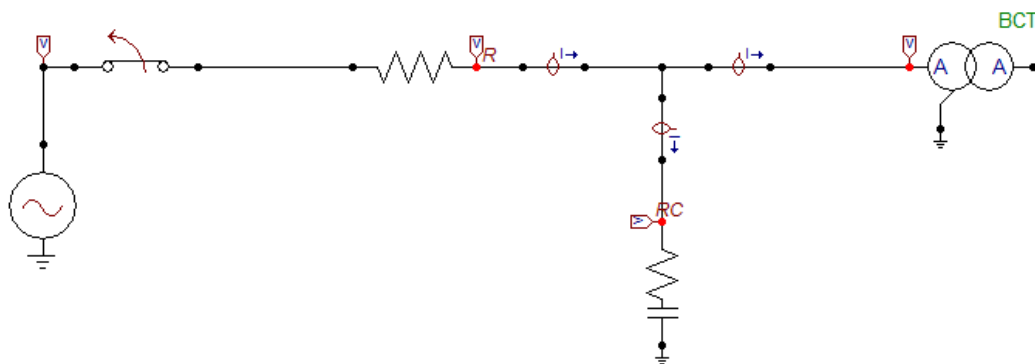


Figura 6.1-2 : Esquema modelado mediante elementos discretos.

Los elementos de la línea y la rama RC, son idénticos a los modelados mediante elementos discretos.

En cuanto al transformador BCTRAN, en él introduciremos valores como la tensión fase-neutro, en primario y secundario, frecuencia y número de fases y arrollamientos en este caso 1 y 2

respectivamente. Además, introducimos valores a cerca de los resultados de los ensayos de vacío y a circuito abierto, como la tensión, la corriente y las pérdidas las cuales en las primeras simulaciones dejaremos valores muy bajos de 100 W aproximadamente, para posteriormente observar los resultados que implica variar las pérdidas.

### 6.1.3 COMPARATIVA MODELADO MEDIANTE ELEMENTOS DISCRETOS FRENTE MODELADO POR BCTRAN

Para realizar la comparativa de los dos circuitos, realizaremos la misma simulación tanto en el modelado mediante elementos discretos como en el modelado mediante el transformador BCTRAN, una simulación en funcionamiento normal sin interrupciones de corriente.

**Simulación modelada mediante elementos discretos:**

- Sin apertura del interruptor.

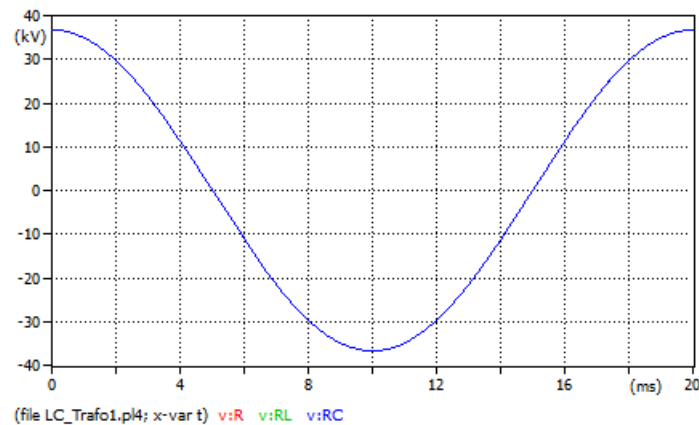


Figura 6.1-3 : Representación tensión en las ramas R, RL y RC.

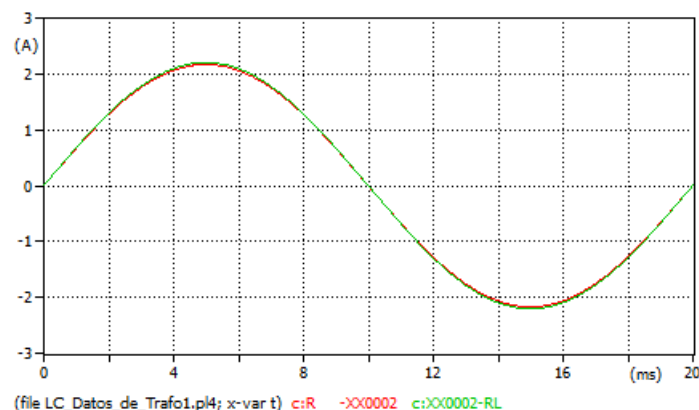


Figura 6.1-4 : Representación corriente en la rama R y RL.

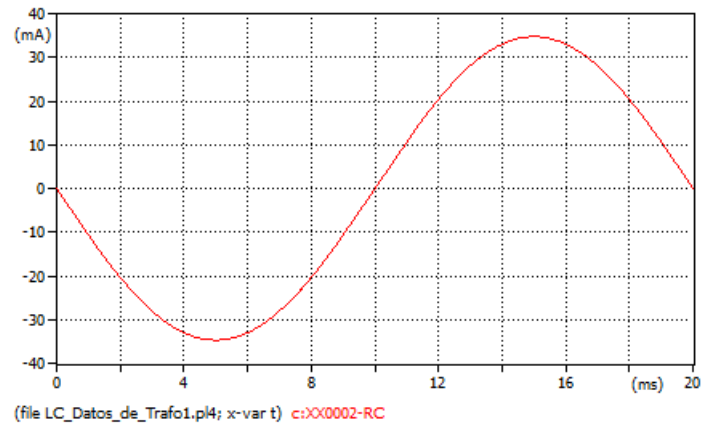


Figura 6.1-5 : Representación corriente en la rama RC.

▪ Con arranque de corriente.

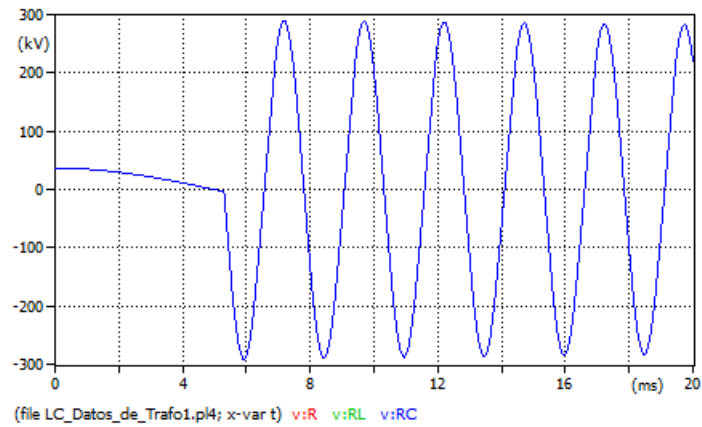


Figura 6.1-6 : Representación tensión en las ramas R, RL y RC.

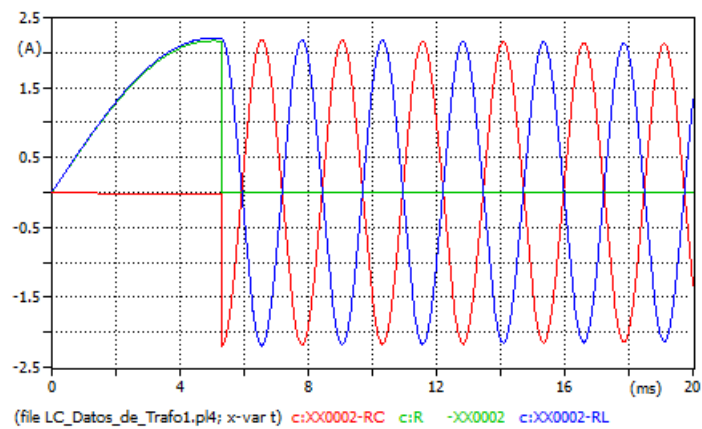


Figura 6.1-7 : Representación corriente en la rama R, RC y RL.

## Simulación modelada mediante BCTAN:

- Sin apertura del interruptor

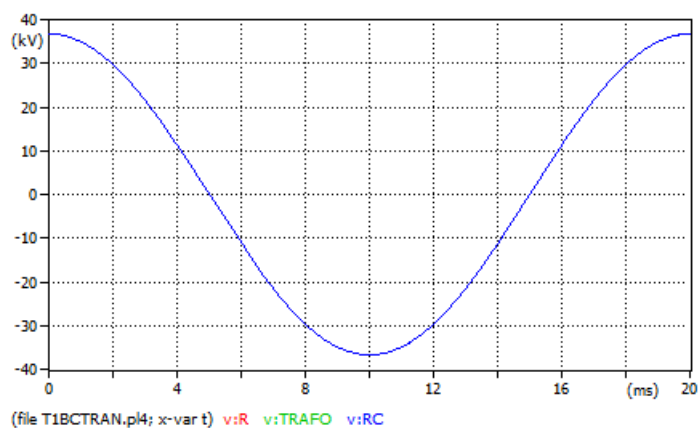


Figura 6.1-8 : Representación tensión en las ramas R, BCTAN y RC.

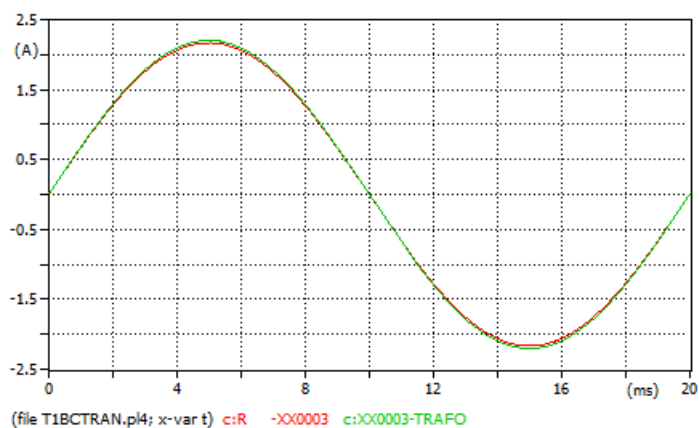


Figura 6.1-9 : Representación corriente en la rama R y BCTAN.

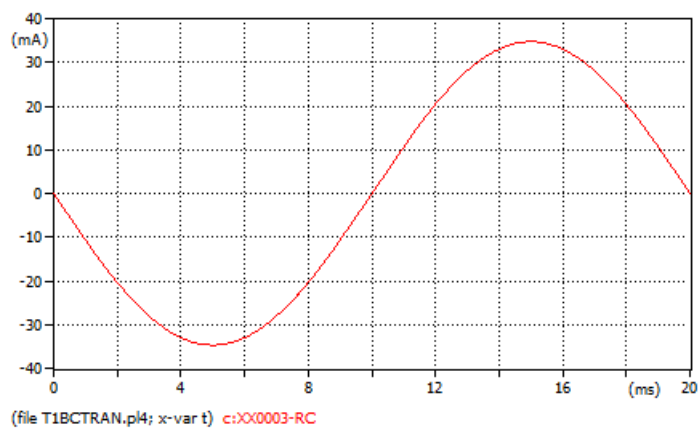


Figura 6.1-10 : Representación corriente en la rama RC.

- **Apertura del interruptor con arranque de corriente.**

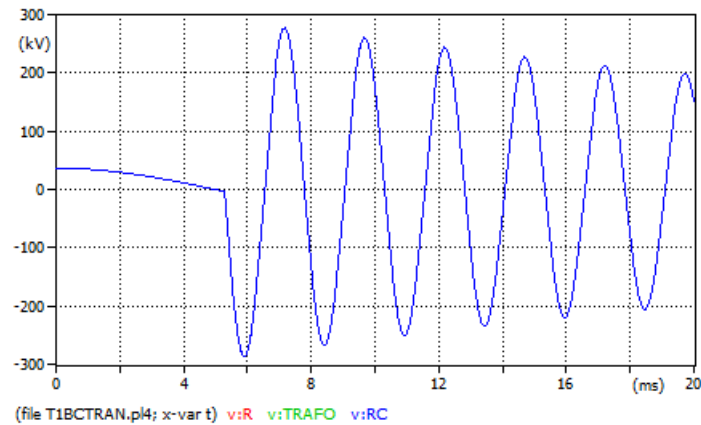


Figura 6.1-11 : Representación tensión en las ramas R, BCTAN y RC.

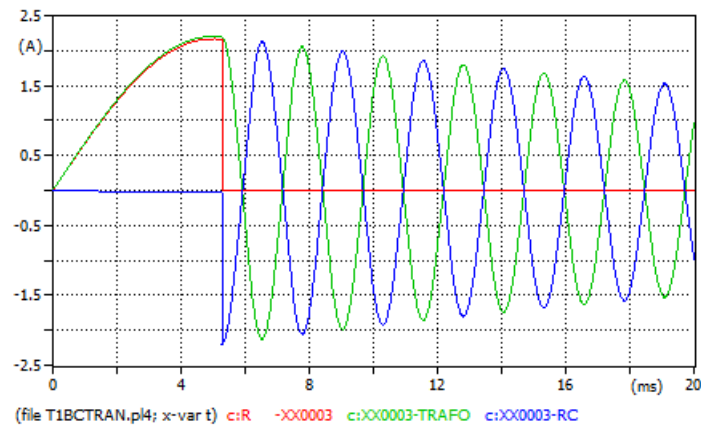


Figura 6.1-12 : Representación corriente en la rama R, RC y BCTAN.

Como podemos observar las simulaciones en el caso en el que no hay interrupción de corriente como cabía de esperar es idéntica.

Sin embargo, si podemos comprobar una pequeña diferencia cuando introducimos un corte de corriente en cualquier instante de tiempo. Esta diferencia, consiste en la distinta forma de amortiguamiento del caso de elementos discretos que es mucho menos amortiguada, y más constante, al caso de BCTAN en el que podemos ver a simple vista que el amortiguamiento es mayor y más rápido. Esto es debido a las pérdidas en el cobre que existen internamente en el transformador que no podemos modelarlas de ninguna manera en las simulaciones mediante elementos discretos. Sin embargo, los casos que nos interesan como pueden ser los picos de tensión y corriente que se ocasionan sí son idénticos. Por ello, de ahora en adelante el resto de las simulaciones las realizaremos mediante las simulaciones realizadas con el BCTAN, ya que se aproxima más al método real.

## 6.2 INFLUENCIA DE LOS INSTANTES DE CORTE EN LA SOBRENTENSIÓN

En este apartado, realizaremos diferentes simulaciones interrumpiendo diferentes magnitudes de corriente en distintos instantes de tiempo, en tres casos, para tres transformadores. Con el objetivo final de comprobar las consecuencias e influencias que tiene interrumpir corriente en un sistema eléctrico, para la sobretensión que genera.

Posteriormente compararemos los resultados de los tres transformadores en los que realizaremos estas simulaciones, los transformadores 1, 2 y 3.

### 6.2.1 TRANSFORMADOR 1

El primer y más pequeño de los transformadores tiene una potencia de 15 MVA, y le corresponden los siguientes datos:

Trafo	Potencia (MVA)	U1N (kV)	U1fn (kV)	U2N (kV)	U2fn (kV)	IN1 (A)	I0 (%)	Io (A)	Ife (A)	Im (A)	Pfe (W)
T1	15	45	25,98	16,05	9,266	577	0,3	1,56	0,00385	1,56	100

Trafo	Rfe ( $\Omega$ )	Lm (H)	CH (nF)
T1	41,2	53	3,01

Tabla 5: Datos transformador 1.

#### 6.2.1.1 PRIMERA SIMULACIÓN

Durante la primera simulación realizaremos una interrupción de corriente en el máximo positivo de la misma. Este instante corresponde aproximadamente con una interrupción de 2.2 A en el instante 0.005 s. Los resultados de dicha simulación son los siguientes:

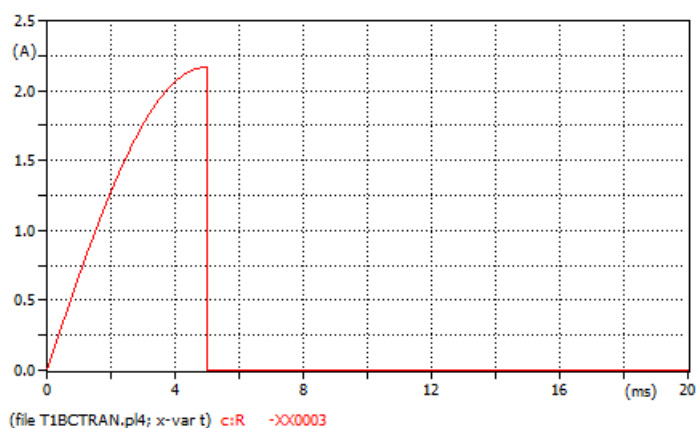


Figura 6.2-1 : Representación del corte de corriente de la línea, en el instante máximo.

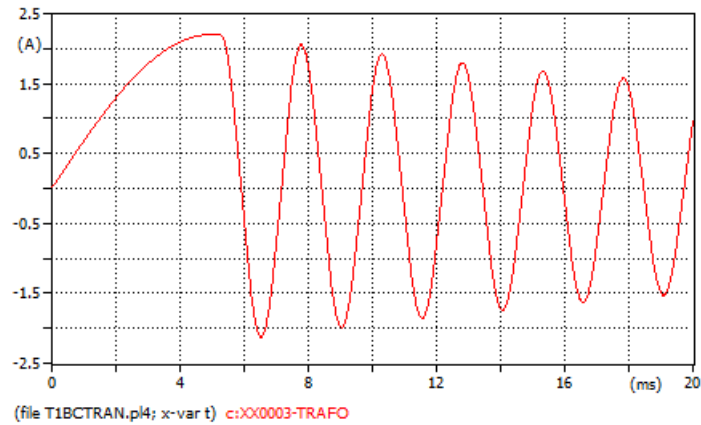


Figura 6.2-2 : Representación de la evolución de corriente en el transformador.

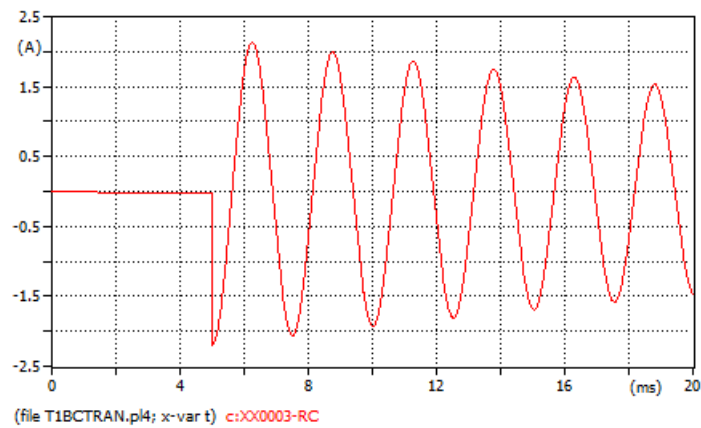


Figura 6.2-3 : Representación de la evolución de corriente en la rama RC.

Como podemos observar en las figuras 6.2-2 y 6.2-3, se producen tras el corte de corriente en su punto máximo, unos picos de corriente y unas posteriores oscilaciones, debido a que las bobinas del transformador estaban cargadas de corriente en el momento de corte, en el punto máximo en este caso, y esta capacidad de almacenaje de corriente de las bobinas no puede reducirse a cero al instante, tal y como sí sucede en la línea. Por ello, se producen estas oscilaciones de corriente que las bobinas tendrán que liberar, a través de las capacidades, en las que por ese motivo se produce el pico de corriente y sus oscilaciones.

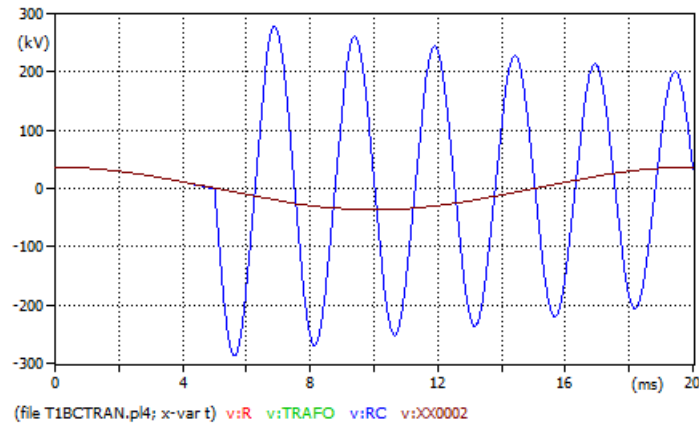


Figura 6.2-4 : Representación de la evolución de tensión.

En la anterior figura, podemos observar cómo tras la interrupción de corriente en su punto máximo, que coincide con un cero de tensión, se produce una sobretensión importante y una posterior oscilación, debido a que las capacidades entran en un proceso de carga y descarga, alimentadas por las inductancias.

En color oscuro podemos ver la tensión en la fuente para poder comparar el funcionamiento normal, con la sobretensión obtenida, que como vemos es del orden de 9 veces mayor que la tensión nominal.

Esta sobretensión y su frecuencia natural de oscilación, la podemos calcular mediante las siguientes fórmulas, las cuales ya habíamos visto con anterioridad en capítulos anteriores:

$$U_{\max} = \sqrt{U_0^2 + \frac{L_t}{C_t} I_0^2}$$

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_\mu C_{HV}}}$$

Finalmente, en cuanto a esta primera simulación podemos obtener los siguientes resultados:

RESULTADOS OBTENIDOS EN LA SIMULACIÓN	
Corriente arrancada	2,2 A
Instante de tiempo de apertura del disyuntor	0,005 s
Valor máximo de tensión	293 KV
Valor máximo de corriente	2,2 A
Frecuencia natural	398,3 Hz

Tabla 6: Resultados obtenidos en la primera simulación del transformador 1.



### 6.2.1.2 SEGUNDA SIMULACIÓN

Durante la segunda simulación realizaremos un corte de corriente en el instante en el que la corriente pasa por su cero natural. Instante real en el que el disyuntor debería de abrir el circuito para generar menores sobretensiones. A continuación, podremos comprobarlo.

En este caso, cortaremos la corriente en instante 0.02 segundos, un ciclo completo, momento en el que la corriente es nula.

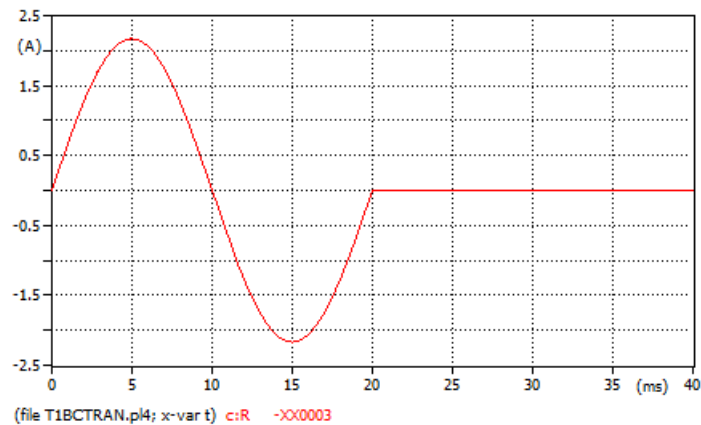


Figura 6.2-5 : Representación del corte de corriente de la línea.

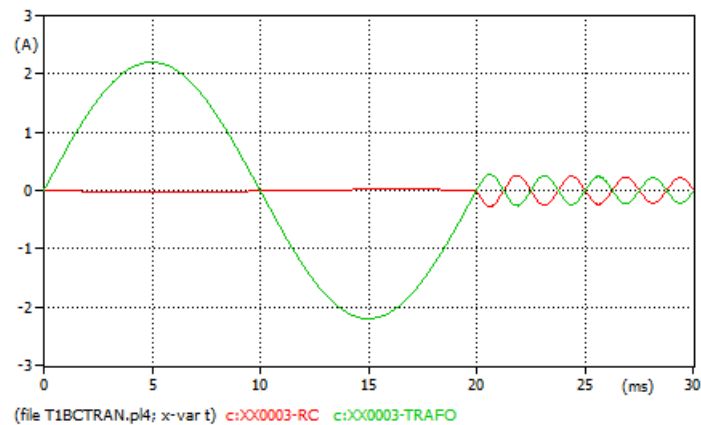


Figura 6.2-6 : Representación de la evolución de corriente en el transformador y en la rama RC.

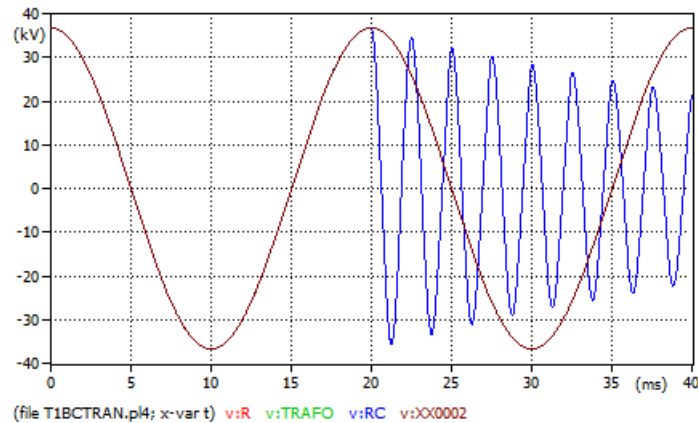


Figura 6.2-7 : Representación de la evolución de tensión.

Como podemos ver en esta simulación, en la que la desconexión se da en el paso por cero de la corriente, que coincide con el máximo de la tensión, la capacidad se ha quedado cargada en un valor muy próximo al valor de tensión máxima. Sin embargo, la inductancia quedó descargada al ser la corriente nula en ese instante, pero será entonces cuando se produzca la descarga de la capacidad alimentando la inductancia produciéndose así el proceso oscilatorio.

RESULTADOS OBTENIDOS EN LA SIMULACIÓN	
Corriente arrancada	0 A
Instante de tiempo de apertura del disyuntor	0,02 s
Valor máximo de tensión	36,7 KV
Valor máximo de corriente tras el corte	0,27 A
Frecuencia natural	398,3 Hz

Tabla 7: Resultados de la segunda simulación del transformador 1.

### 6.2.1.3 COMPARATIVA SIMULACIONES TRANSFORMADOR 1

Tras realizar ambas simulaciones, en el mismo transformador podemos deducir en que instante será mejor interrumpir la corriente.

Durante la primera simulación, en la que el disyuntor abrió el circuito cuando la corriente tenía un valor máximo, pudimos ver como las sobretensiones generadas eran muy grandes de más de 9 veces mayores al valor de su tensión nominal y posteriormente se generaba una oscilación. Sin embargo, en la segunda simulación, al cortar la corriente en cero, esta sobretensión no sucede, si no que la amortiguación ocurre en el instante de máxima tensión de funcionamiento normal.

En cuanto a la frecuencia natural de amortiguación vemos que no depende ni de la corriente ni de la tensión por tanto ambas oscilaciones son idénticas en forma.

Por tanto, podemos confirmar que, en cualquier caso, la apertura del disyuntor debe de realizarse durante el paso por cero de la corriente, para así no generar sobretensiones que puedan dañar los sistemas de aislamiento y como consecuencia la instalación.

## 6.2.2 TRANSFORMADOR 2

En este segundo transformador, será modelado del mismo modo que el anterior, mediante la simulación con BCTRAN y tiene los siguientes datos:

Trafo	Potencia (MVA)	U1N (kV)	U1fn (kV)	U2N (kV)	U2fn (kV)	IN1 (A)	IO (%)	Io (A)	Ife (A)	Im (A)	Pfe (W)
T2	25	45	25,98	16,05	9,266	962	0,1	0,87	0,00385	0,87	100

Trafo	Rfe ( $\Omega$ )	Lm (H)	CH (nF)
T2	133,3	95,49	3,18

Tabla 8: Datos del transformador 2.

Realizaremos de nuevo dos simulaciones con los mismos instantes de corte, para posteriormente comparar los resultados con los demás transformadores.

### 6.2.2.1 PRIMERA SIMULACIÓN

En la primera simulación nuevamente cortaremos la corriente en su punto máximo coincidiendo con el cero de tensión. Este instante corresponde a 0.005 s con 1.2 A. Los resultados de dicha simulación son los siguientes:

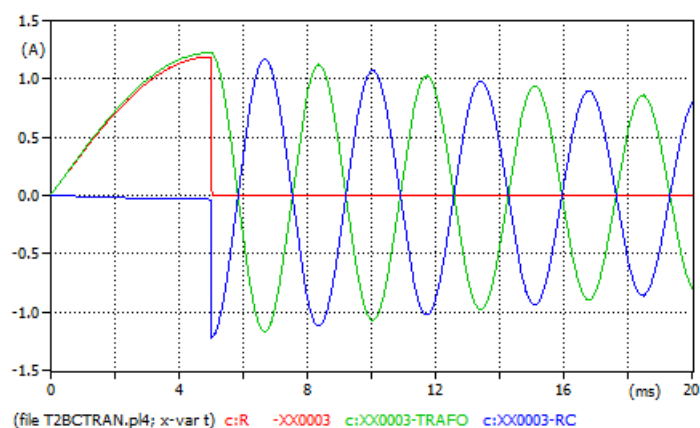


Figura 6.2-8 : Representación de las corrientes.

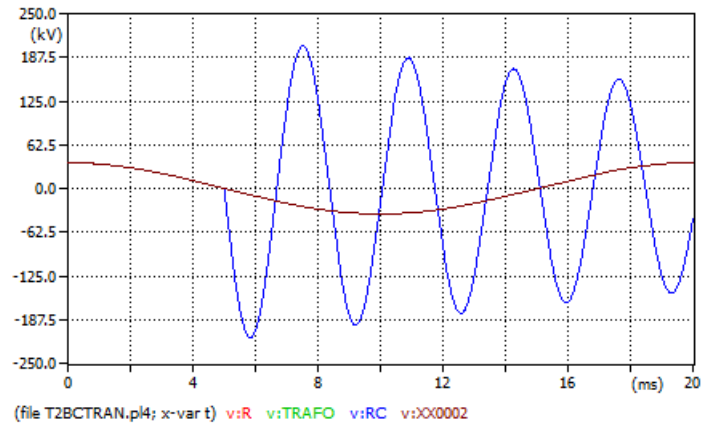


Figura 6.2-9 : Representación de las tensiones.

En esta simulación como era de esperar son idénticos en cuanto al comportamiento del transformador. Numéricamente, los resultados son los siguientes:

RESULTADOS OBTENIDOS EN LA SIMULACIÓN	
Corriente arrancada	1,2 A
Instante de apertura del disyuntor	0,005 s
Valor máximo de tensión	207,9 KV
Valor máximo de corriente	1,2 A
Frecuencia natural	288,8 Hz

Tabla 9: Resultados obtenidos en la primera simulación del transformador 2.

### 6.2.2.2 SEGUNDA SIMULACIÓN

En la segunda simulación realizaremos la misma operación que con el primer transformador, realizaremos el corte en el paso natural por cero de la corriente para así poder comprobar como los resultados obtenidos, sobretodo en cuanto a las sobretensiones generadas son más beneficiosos o menos agresivos para el sistema de aislamiento.

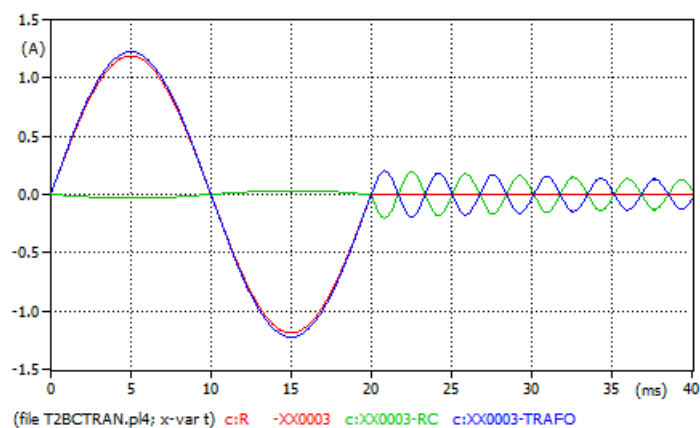


Figura 6.2-10: Representación de las corrientes.

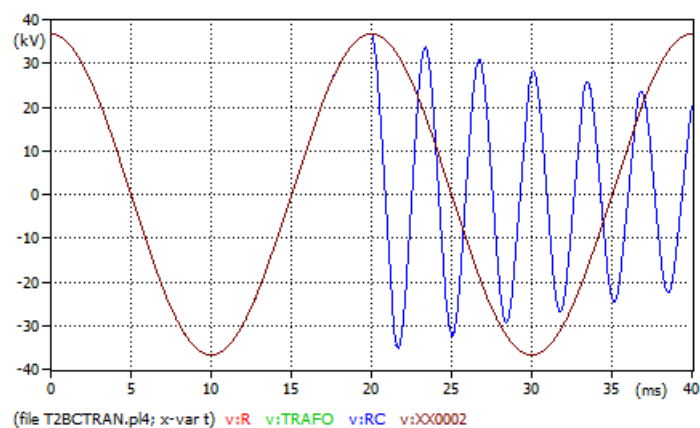


Figura 6.2-11: Representación de las tensiones.

En esta simulación hemos podido obtener:

RESULTADOS OBTENIDOS EN LA SIMULACIÓN	
Corriente interrumpida	0 A
Instante de tiempo de interrupción	0,02 s
Valor máximo de tensión	36,7 KV
Valor máximo de corriente tras el corte	0,2 A
Frecuencia natural	288,8 Hz

*Tabla 10: Resultados obtenidos en la segunda simulación del transformador 2.*

#### 6.2.2.3 COMPARATIVA SIMULACIONES TRANSFORMADOR 2

Tras haber realizado las simulaciones en el segundo transformador, podemos analizar los resultados de este.

Como nos había pasado en el primer transformador las sobretensiones generadas en el caso en el que la corriente sea cortada durante su máximo, son de una gran magnitud sobre el valor de tensión nominal, de prácticamente 6 veces mayor, por tanto, nuevamente podrían ocasionar daños a los aislamientos.

### 6.2.3 TRANSFORMADOR 3

En la última simulación para analizar los instantes de corte, utilizaremos un tercer transformador, pero bastante más grande respecto a los anteriores, en cuanto a tensión y potencia. Sus datos correspondientes son los siguientes:

Trafo	Potencia (MVA)	U1N (kV)	U1fn (kV)	U2N (kV)	U2fn (kV)	IN1 (A)	I0 (%)	Io (A)	Ife (A)	Im (A)	Pfe (W)
T3	75	220	127	71	40,99	590	0,1	0,47	0,00079	0,47	100

Trafo	Rfe ( $\Omega$ )	Lm (H)	CH (nF)
T3	448	855,7	4,51

Tabla 11: Datos del transformador 3.

#### 6.2.3.1 PRIMERA SIMULACIÓN

En la primera simulación volveremos a cortar la corriente en su punto máximo coincidiendo con el cero de tensión. Este instante corresponde a 0.005 s con 0.6 A. Los resultados de dicha simulación son los siguientes:

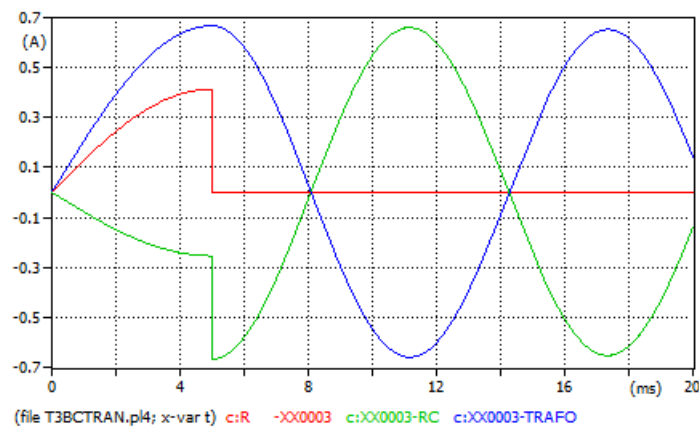


Figura 6.2-12 : Representación de las corrientes.



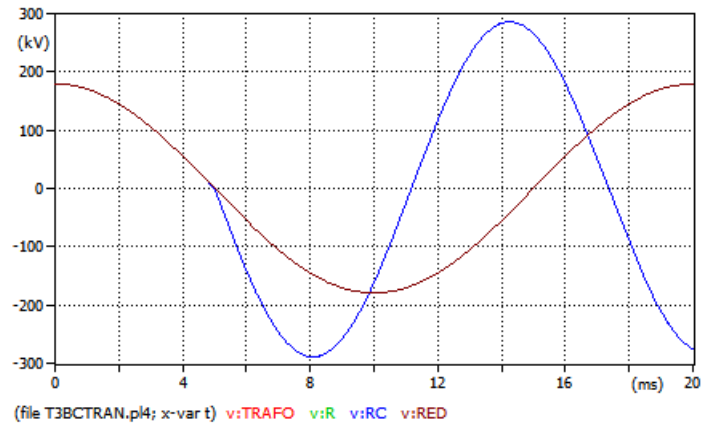


Figura 6.2-13 : Representación de las tensiones.

Numéricamente, los resultados son los siguientes:

RESULTADOS OBTENIDOS EN LA SIMULACIÓN	
Corriente interrumpida	0,6 A
Instante de tiempo de interrupción	0,005 s
Valor máximo de tensión	290,5 KV
Valor máximo de corriente tras el corte	0,667
Frecuencia natural	81 Hz

Tabla 12: Resultados obtenidos en la primera simulación del transformador 3.

### 6.2.3.2 SEGUNDA SIMULACIÓN

En la segunda simulación realizaremos de nuevo un corte en el paso natural por cero de la corriente.

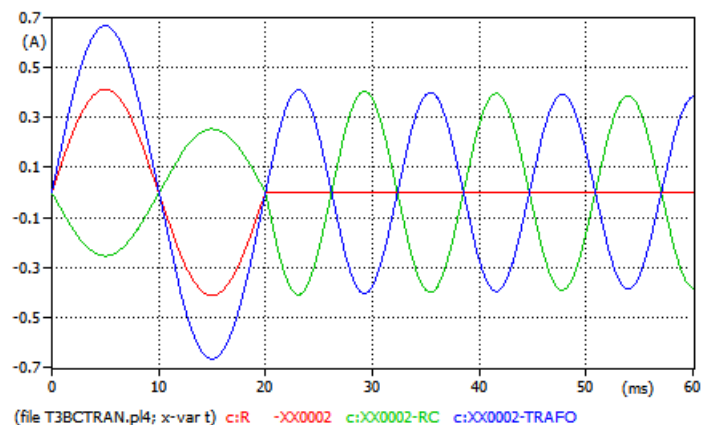


Figura 6.2-14 : Representación de las corrientes.

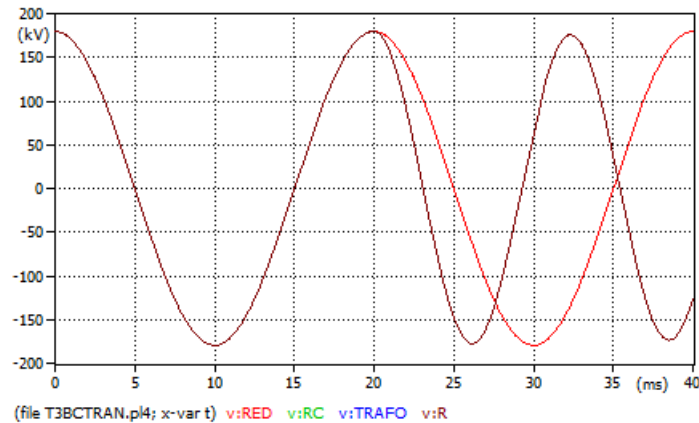


Figura 6.2-15 : Representación de las tensiones.

En esta simulación hemos podido obtener:

RESULTADOS OBTENIDOS EN LA SIMULACIÓN	
Corriente interrumpida	0A
Instante de tiempo de interrupción	0,02 s
Valor máximo de tensión	179 KV
Valor máximo de corriente tras el corte	0,41 A
Frecuencia natural	81 Hz

Tabla 13: Resultados obtenidos en la segunda simulación del transformador 3.

### 6.2.3.3 COMPARATIVA SIMULACIONES TRANSFORMADOR 3

Tras completar las simulaciones en el tercer transformador, podemos comprobar de nuevo que el peor caso para abrir el interruptor es hacerlo durante el máximo de corriente, pues ocasiona unas fuertes sobretensiones.

Además, en este transformador podemos comprobar que la corriente del transformador es mucho mayor ahora que la corriente de la línea.

Pero sobretodo, cabe destacar, la corriente que circula por el condensador, la cual, en los transformadores 1 y 2 era prácticamente nula, sin embargo, en este transformador es poco menor que la corriente por la línea, este aumento de la corriente en las capacitancias a tierra es debido a la curva magnetizante de este transformador, la cual puede ser una curva flujo-corriente tipo “cobra” como cita *Mork* en su referencia. En las que la capacidad domina sobre la reactancia magnetizante del transformador.

#### 6.2.4 COMPARATIVA TRANSFORMADORES

Tras completar las distintas simulaciones en los diferentes transformadores podremos realizar una serie de comparaciones para lograr un estudio acerca de las diferencias que hemos podido encontrar.

Durante la primera simulación, en la que cortábamos la corriente en su instante máximo, hemos observado que se producen unas sobretensiones muy elevadas de varias veces la tensión nominal, en el primer caso de más de 11 veces mayor, en el segundo de 8 y en el tercero de poco más de 2 veces. El primer transformador, a pesar de ser el de menor potencia, de apenas 15 MVA, ha sido el que mayor sobretensión ha creado de 293 KV y la de mayor frecuencia natural, de casi 400Hz, frente a los 81 Hz de la tercera simulación que también tenía una sobretensión muy similar de 290 KV. Las frecuencias, como hemos visto en anteriores apartados, solo dependen de los valores de la capacidad y de la inductancia y es por ello que el tercer transformador tenga una frecuencia tan pequeña en comparación a los otros dos transformadores, pues su capacidad e inductancia tienen valores mucho más grandes.

Como ya comentamos anteriormente, estas sobretensiones pueden ser un grave problema al ser tan elevadas, pues pueden afectar fácilmente al sistema de aislamiento y acabar dañando la instalación.

En la segunda simulación, se ha observado fácilmente en los tres transformadores por igual, que no existen estas sobretensiones, cuando cortamos la corriente en su paso natural por cero, sino que simplemente tras realizarse el corte la tensión se encontraba en su instante máximo y comenzará a oscilar amortiguándose hasta anularse, debido a que la capacidad se había quedado cargada en un valor próximo al máximo y comenzará a descargarse a través de las inductancias.

Por otro lado, a parte de las simulaciones se puede observar con facilidad, que en los transformadores 1 y 2, la corriente por el transformador y por la red era muy similar, prácticamente idéntica, sin embargo, en el tercer transformador la corriente por el transformador crece en gran medida respecto a la de la red, esto es debido al gran valor de su inductancia de 855.7 H. Al igual, que, debido al gran valor de su condensador, la corriente por el mismo toma valores próximos a la corriente de red.

## 6.3 COMPARACIÓN EN FUNCIÓN DE LAS CAPACIDADES PARÁSITAS DEL TRANSFORMADOR

En este apartado realizaremos distintas simulaciones, con los transformadores 4 y 5, en las que representaremos las capacidades parásitas del transformador como condensadores. Por ello, cambiaremos el número de condensadores que tenga el transformador, una en el lado de alta frente a tener tres, una en alta, otra en baja y otra entre alta y baja con el objetivo de determinar si las dos últimas capacidades mencionadas tienen una influencia apreciable en la cuantía de las sobretensiones que aparecen en bornas del transformador.

Para ello, la estructura que se seguirá será la siguiente, en primer lugar, se mostrarán los resultados de las simulaciones en los diferentes escenarios y al final se realizará una comparación entre los resultados obtenidos en cada simulación y otra entre los dos transformadores con los que trabajaremos.

### 6.3.1 TRANSFORMADOR 4

El transformador 4 es un transformador de alta tensión, de 220KV y una potencia de 40 MVA y posee los siguientes datos:

Trafo	Potencia (MVA)	U1N (kV)	U1fn (kV)	U2N (kV)	U2fn (kV)	IN1 (A)	IO (%)	Io (A)	Ife (A)	Im (A)	Pfe (W)
T4	40	220	127	21,5	12,41	315	0,1	0,28	0,00079	0,28	100

Trafo	Rfe ( $\Omega$ )	Lm (H)	CH (nF)	CL (nF)	CHL (nF)
T4	1245	1426	3,39	9,97	3,27

Tabla 14: Datos transformador 4.

### 6.3.1.1 SIMULACIÓN CON CAPACIDAD EN ALTA

En esta simulación, el circuito solo consideraremos la capacidad a tierra en el lado de alta tensión, como podemos ver en la siguiente figura:

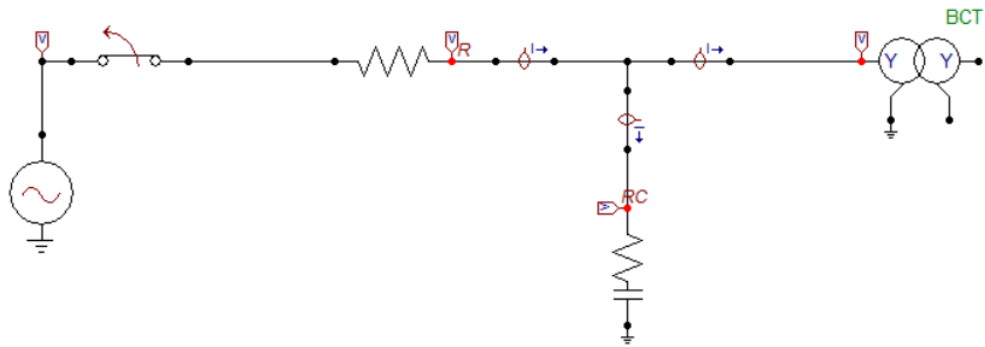


Figura 6.3-1 : Representación del circuito del transformador 4 con su capacidad en el lado de alta tensión.

Simularemos el circuito en funcionamiento normal, esto es, sin que actúe el interruptor, obteniendo los siguientes resultados:

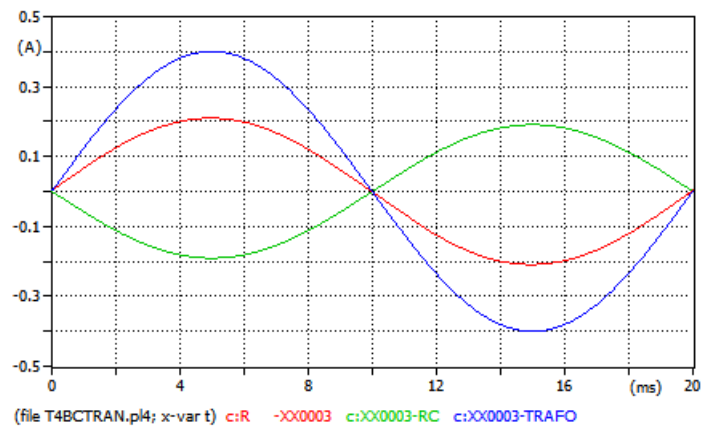


Figura 6.3-2 : Representación de las corrientes.

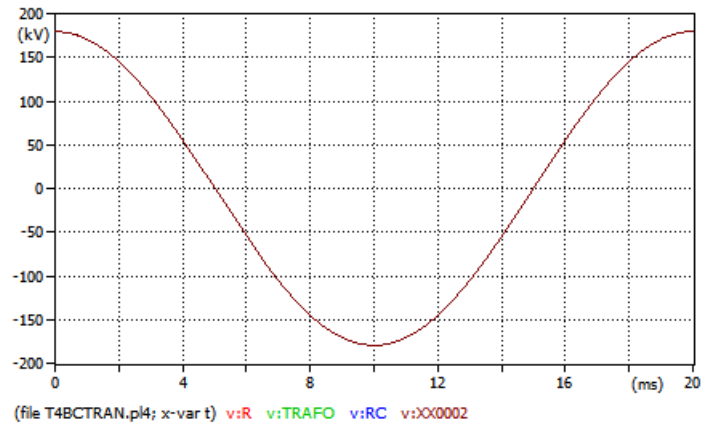


Figura 6.3-2 : Representación de las tensiones.

Los resultados obtenidos en esta simulación son los siguientes:

RESULTADOS OBTENIDOS EN LA SIMULACIÓN	
Capacidades	CH
Valor máximo de corriente de la red	0,21 A
Valor máximo de corriente en el trafo	0,4 A
Valor máximo de corriente en RCAIta	0,19 A
Valor máximo de tensión	179,6 KV
Frecuencia natural	72,38 Hz

Tabla 15: Resultados obtenidos en la primera simulación del transformador4.

Tras esta simulación, realizaremos una nueva simulación en la que cortemos la corriente en su punto máximo en la red, obteniendo los siguientes resultados:

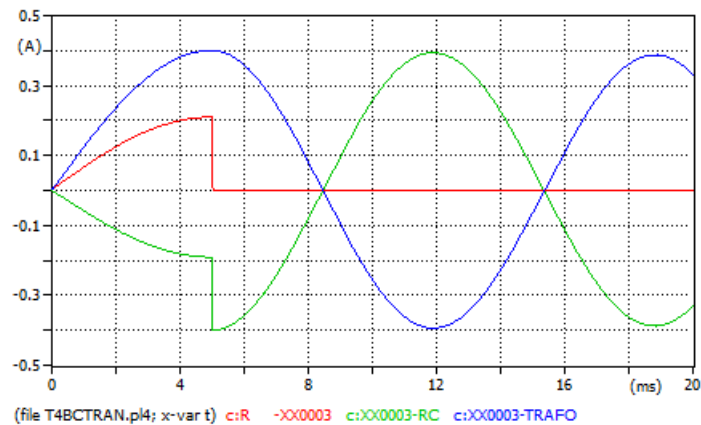


Figura 6.3-3 : Representación de las corrientes.

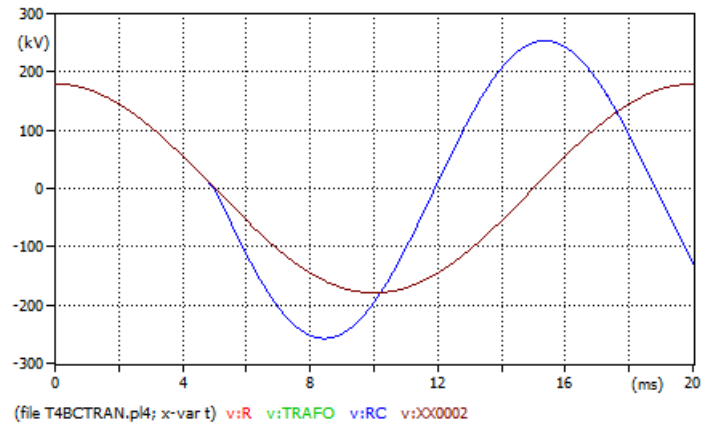


Figura 6.3-4 : Representación de las tensiones.

RESULTADOS OBTENIDOS EN LA SIMULACIÓN	
Capacidades	CH
Corriente interrumpida	0,21 A
Instante de tiempo de interrupción	0,005 s
Valor máximo de corriente tras la interrupción en trafo y CH	0,4 A
Valor máximo de tensión	258 KV
Frecuencia natural	72,38 Hz

Tabla 16: Resultados obtenidos en la segunda simulación del transformador 4.

### 6.3.1.2 SIMULACIÓN CAPACIDADES EN ALTA, BAJA Y EN PARALELO

En esta simulación instalaremos dos capacitancias más, en el lado de baja tensión del transformador y otra en paralelo entre ambos lados, alta y baja. De la siguiente forma:

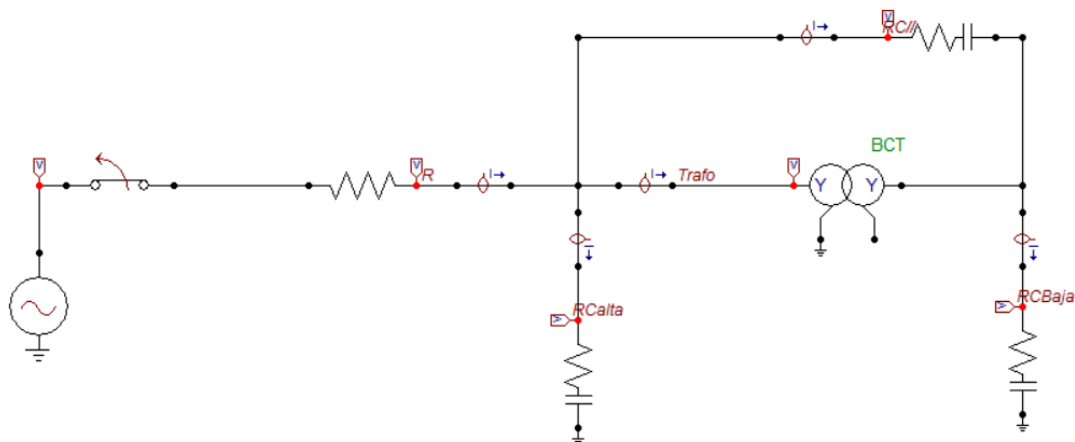


Figura 6.3-5 : Representación del circuito con capacidades en alta, baja y en paralelo.

Y el valor de las capacidades son:

Trafo	CH (nF)	CL (nF)	CHL (nF)
T4	3,39	9,97	3,27

Tabla 17: Datos de los condensadores del transformador 4.

Los resultados obtenidos en su funcionamiento normal son los siguientes:

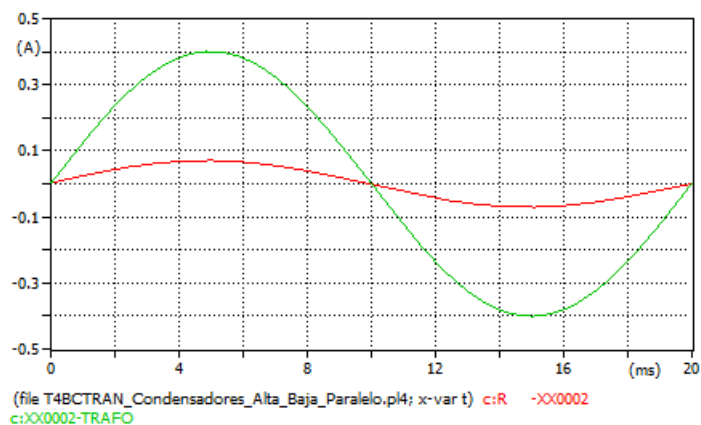


Figura 6.3-6 : Representación de las corrientes de red y del transformador.



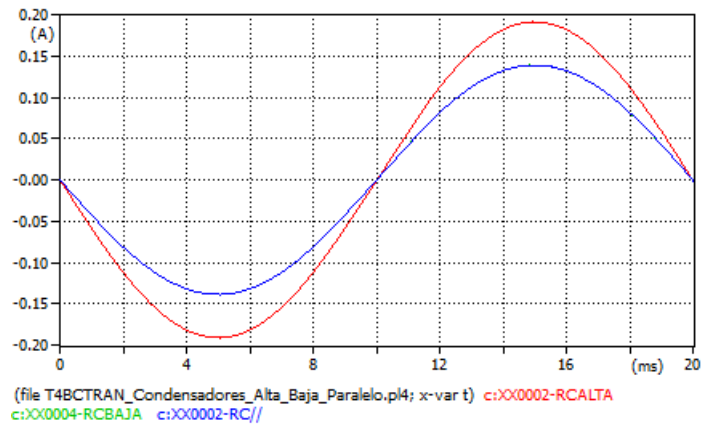


Figura 6.3-7 : Representación de las corrientes de los condensadores, en las que la corriente del condensador en alta y en paralelo coinciden.

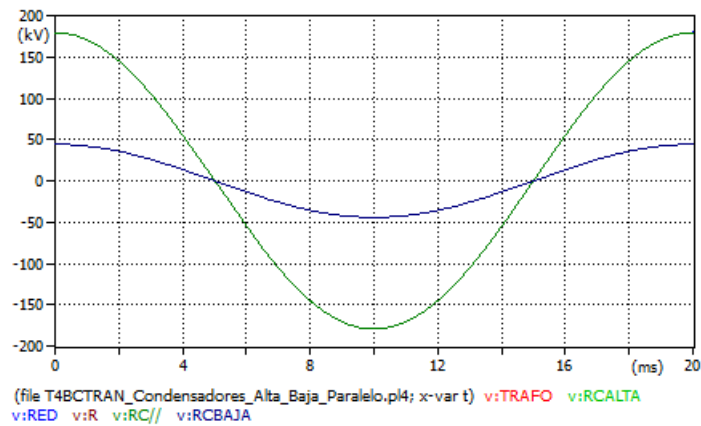


Figura 6.3-8 : Representación de las Tensiones, en las que la tensión en baja es la pequeña, el resto son coincidentes.

Finalmente hemos obtenido:

RESULTADOS OBTENIDOS EN LA SIMULACIÓN	
Capacidades	CH, CL, CHL
Valor máximo de corriente de la red	0,07 A
Valor máximo de corriente en el transformador	0,4 A
Valor máximo de corriente en RCAlta	0,19 A
Valor máximo de corriente en RCBaja	0,14 A
Valor máximo de corriente en RC//	0,14 A
Valor máximo de tensión	179 KV
Valor máximo de tensión en baja	45 KV

Tabla 18: Resultados obtenidos en la tercera simulación del transformador 4.

Ahora, en el mismo circuito realizaremos una segunda simulación interrumpiendo corriente en el máximo de la corriente de la red. Y obtendremos los siguientes resultados:

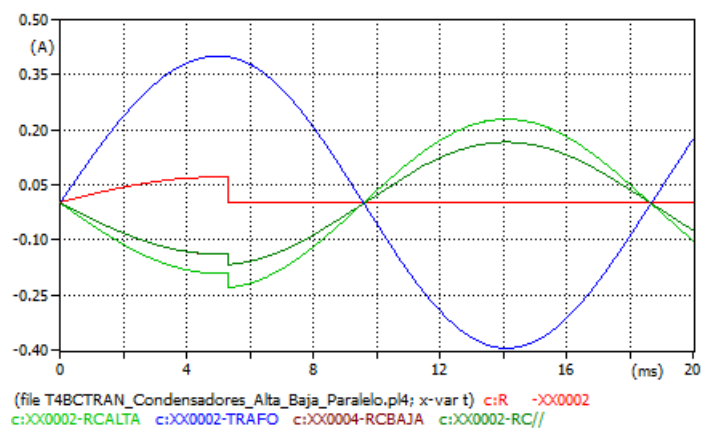


Figura 6.3-9 : Representación de las corrientes, en las que la corriente en baja y en paralelo son la misma.

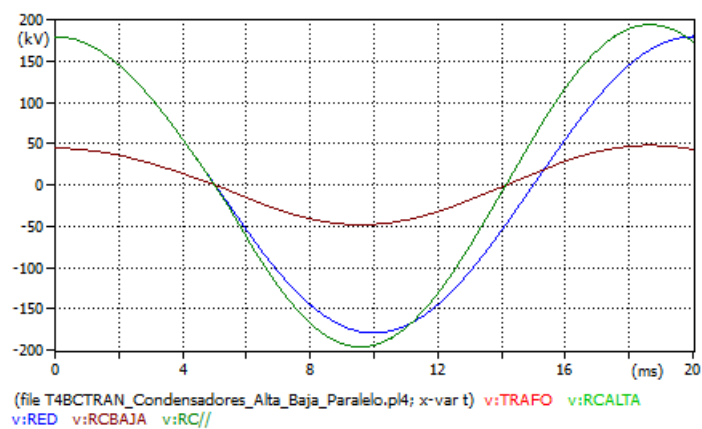


Figura 6.3-10 : Representación de las tensiones.

Tras la interrupción de corriente estos son los resultados obtenidos:

RESULTADOS OBTENIDOS EN LA SIMULACIÓN	
Capacidades	CH, CL, CHL
Corriente interrumpida	0,07 A
Instante de tiempo de interrupción	0,005 s
Valor máximo de corriente tras la interrupción en BCTran	0,4 A
Valor máximo de corriente tras la interrupción en RCAI	0,23 A
Valor máximo de corriente tras la interrupción en RC//	0,17 A
Valor máximo de corriente tras la interrupción en RCBaja	0,17 A
Valor máximo de tensión tras el corte en BCTran, línea, CH y CHL	196 KV
Valor máximo de tensión tras el corte en CL	48 KV

Tabla 19: Resultados obtenidos en la cuarta simulación del transformador 4.

#### 6.3.1.4 COMPARATIVA SIMULACIONES TRANSFORMADOR 4

En el primer caso, sin interrupción de corriente (figuras 6.3-2 y 6.3-6), podemos observar a simple vista que el valor de corriente por la red es mayor antes de introducir las otras dos capacidades. Esto es debido a que el transformador, cuando solo tiene un condensador, toma la corriente de este y de la red. En el caso en el que introducimos los otros dos condensadores, el transformador puede tomar la corriente de la red y de estos tres condensadores y de ahí se debe que la corriente sea menor, pues toma menos corriente de la red en el primer caso que en el segundo.

En el caso, en el que interrumpimos corriente, podemos observar que la sobretensión generada es mucho mayor cuando solo teníamos un condensador en alta tensión, por tanto, podemos deducir que nos interesará en cuanto a reducir las sobretensiones generadas en la interrupción de corriente, utilizar el caso con condensadores en paralelo, en alta y en baja tensión. Que la sobretensión sea menor cuando introducimos los dos condensadores, es fácil verlo mediante la siguiente ecuación que vimos en el apartado 5.2 cuando explicamos las sobretensiones generadas cuando se arranca corriente.

$$U_{\max} = \sqrt{U_0^2 + \frac{L_t}{C_t} I_0^2}$$

Como vemos, la tensión máxima generada depende entre otros, de las capacidades, y por tanto si hacemos el equivalente de las capacidades, cuantas más tengamos el término  $C_t$  será también mayor y por tanto las sobretensiones máximas generadas menores.

### 6.3.2 TRANSFORMADOR 5

Tras completar las simulaciones con el cuarto transformador, realizaremos las mismas simulaciones con el quinto y el más grande de los transformadores que disponemos, para posteriormente poder realizar una comparativa. Los datos de este transformador son los siguientes:

Trafo	Potencia (MVA)	U1N (kV)	U1fn (kV)	U2N (kV)	U2fn (kV)	IN1 (A)	I0 (%)	Io (A)	Ife (A)	Im (A)	Pfe (W)
T5	150	230	132,8	71	40,99	1130	0,1	0,68	0,00075	0,68	100

Trafo	Rfe ( $\Omega$ )	Lm (H)	CH (nF)	CL (nF)	CHL (nF)
T5	217,7	623,7	4,58	12,9	6,79

Tabla 20: Datos del transformador 5.

#### 6.3.2.1 SIMULACIÓN CON CAPACIDAD EN ALTA

Como en el anterior, transformador realizaremos una primera simulación en funcionamiento normal del transformador con una capacidad en el lado de alta tensión.

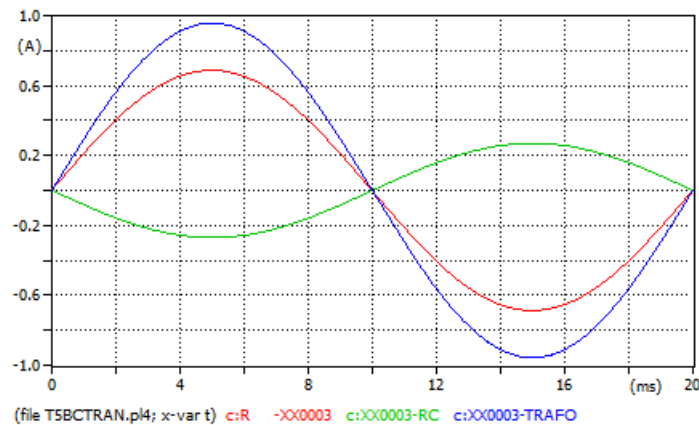


Figura 6.3-11 : Representación de las corrientes.

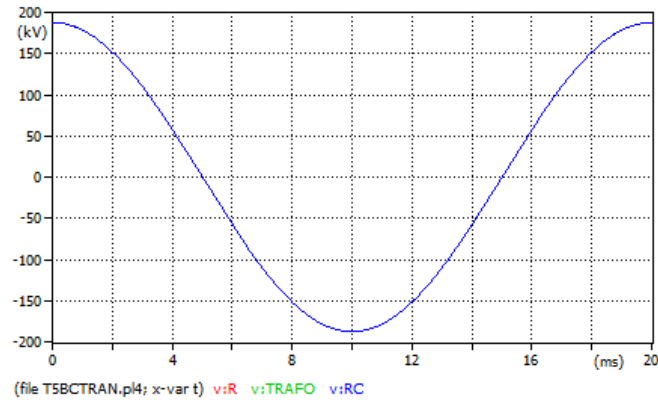


Figura 6.3-12 : Representación de las tensiones.

RESULTADOS OBTENIDOS EN LA SIMULACIÓN	
Capacidades	CH
Valor máximo de corriente de la red	0,69 A
Valor máximo de corriente en el trafo	0,96 A
Valor máximo de corriente en RCAIta	0,27 A
Valor máximo de tensión	187 KV
Frecuencia natural	94,16 Hz

Tabla 21: Resultados obtenidos en la primera simulación del transformador 5.

Ahora, realizaremos de nuevo en el mismo circuito otra simulación, pero cortando corriente en el valor máximo de corriente.

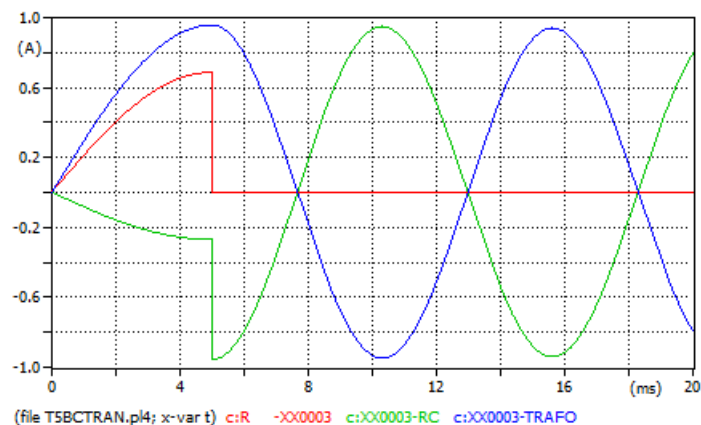


Figura 6.3-13 : Representación de las corrientes.

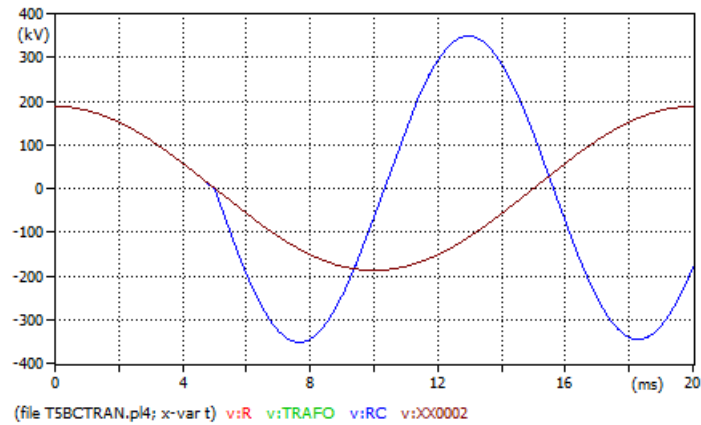


Figura 7.3-14 : Representación de las tensiones.

RESULTADOS OBTENIDOS EN LA SIMULACIÓN	
Capacidades	CH
Corriente interrumpida	0,689 A
Instante de tiempo de interrupción	0,005 s
Valor máximo de corriente tras la interrupción en trafo y CH	0,96 A
Valor máximo de tensión	352 KV
Frecuencia natural	94,16 Hz

Tabla 22: Resultados obtenidos en la segunda simulación del transformador 5.

### 6.3.2.2 SIMULACIÓN CAPACIDADES EN ALTA, BAJA Y EN PARALELO

De igual manera, realizaremos una primera simulación, en su funcionamiento normal:

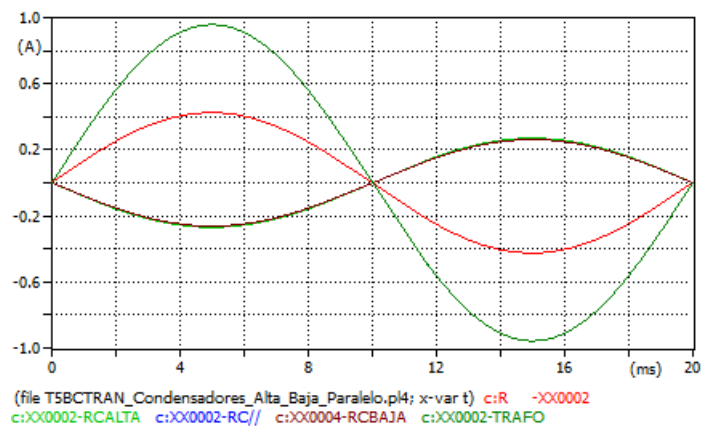


Figura 6.3-15 : Representación de las corrientes.

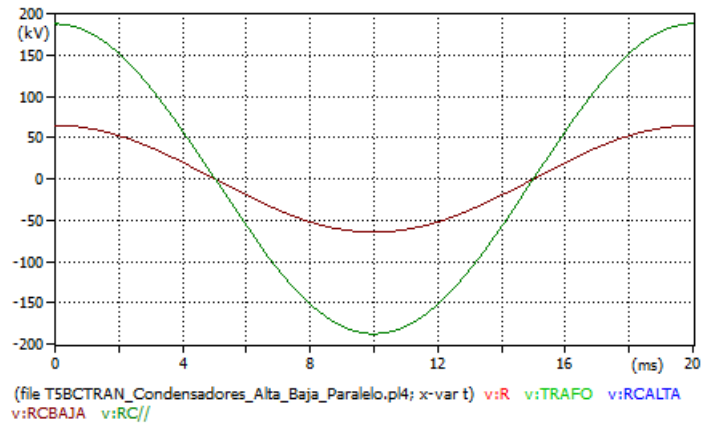


Figura 6.3-16 : Representación de las tensiones.

RESULTADOS OBTENIDOS EN LA SIMULACIÓN	
Capacidades	CH, CL, CHL
Valor máximo de corriente de la red	0,425 A
Valor máximo de corriente en el trafo	0,96 A
Valor máximo de corriente en RCAIta	0,27 A
Valor máximo de corriente en RCBaja	0,26 A
Valor máximo de corriente en RC//	0,26 A
Valor máximo de tensión	187 KV
Valor máximo de tensión en baja	65 KV

Tabla 23: Resultados obtenidos en la tercera simulación del transformador 5.

Segunda simulación, interrumpiendo la corriente en su punto máximo:

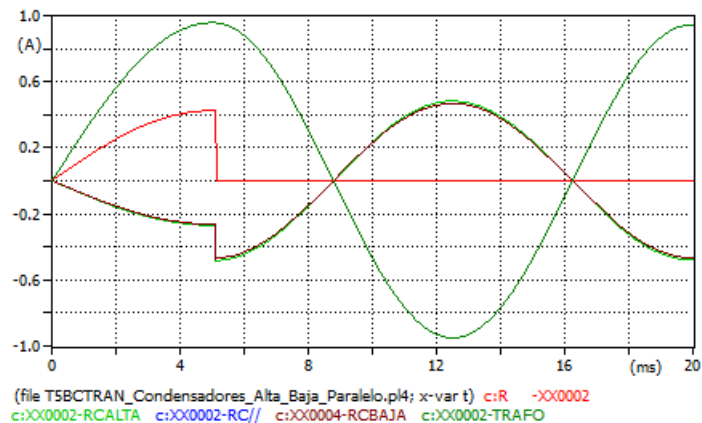


Figura 6.3-17 : Representación de las corrientes.

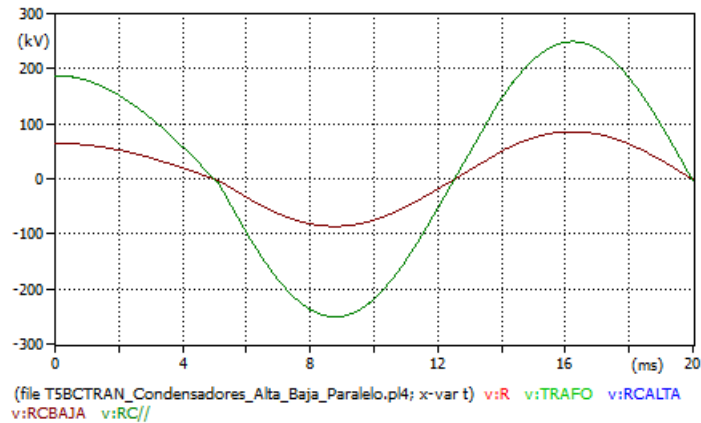


Figura 6.3-18 : Representación de las tensiones.

RESULTADOS OBTENIDOS EN LA SIMULACIÓN	
Capacidades	CH, CL, CHL
Corriente interrumpida	0,425 A
Instante de tiempo de interrupción	0,005 s
Valor máximo de corriente tras la interrupción en BCTRAN	0,957 A
Valor máximo de corriente tras la interrupción en CRAIta	0,485 A
Valor máximo de corriente tras la interrupción en CR//	0,471 A
Valor máximo de corriente tras la interrupción en CRBaja	0,471 A
Valor máximo de tensión tras el corte en BCTRAN, línea, CH y CHL	250 KV
Valor máximo de tensión tras el corte en CL	86,5 KV

Tabla 24: Resultados obtenidos en la cuarta simulación del transformador 5.

### 6.3.2.3 COMPARATIVA SIMULACIONES TRANSFORMADOR 5

Como en el caso anterior con el transformador 4, cabe destacar que cuando interrumpimos corriente, la sobretensión generada es mucho mayor cuando solo teníamos un condensador en alta tensión, que cuando introducimos los otros dos en baja y en paralelo, 1.4 veces mayor.

También podemos comprobar que cuando solo disponemos de un condensador en el sistema, la corriente que absorbe el transformador de la red es mayor, que cuando instalamos los tres condensadores pues como ya explicamos anteriormente el transformador reparte la corriente absorbida entre los tres condensadores y la red.



### 6.3.3 COMPARATIBA ENTRE TRANSFORMADORES

En primer lugar, comentaremos la diferencia acerca de las corrientes absorbidas por cada transformador de la red. El transformador 4 al incluir los condensadores, pasa a absorber un 35% de la corriente que absorbía de la red cuando solo disponía del condensador en alta. El transformador 5, deja de absorber de la red un 22% menos de corriente de la red.

Como ya explicamos, esto es debido a que ahora también absorberán corriente del resto de transformadores. La corriente que deja de aportar la red ahora, será aportada por el condensador en paralelo, ya que el condensador en alta tensión sigue aportando al transformador la misma corriente.

En cuanto a las sobretensiones, ambas se ven reducidas al incorporar los condensadores, y prácticamente de igual manera, pues el transformador 4 reduce esta sobretensión 1.3 veces frente a 1.4 veces que la reduce el transformador 5.

## 6.4 INFLUENCIA DE LAS PERDIDAS EN EL HIERRO

En este apartado, realizaremos una serie de simulaciones en las que incluiremos las pérdidas en el hierro originarias en estos transformadores, para posteriormente poder comparar los resultados de los diferentes transformadores, con estas pérdidas reales y con las mínimas pérdidas que supusimos en todos los casos de anteriores apartados, en las que supusimos unas pérdidas de 100 W, sumamente pequeñas como para suponerlas prácticamente nulas y minimizar su efecto.

Tras las simulaciones podremos ver la influencia que tienen las pérdidas en el hierro de un transformador en las sobretensiones generadas tras la apertura del circuito.

Para esta comparación, utilizaremos los transformadores 1 y 3, en los casos iniciales en los que solo teníamos una capacidad en alta tensión.

### 6.4.2 TRANSFORMADOR 1

El primer estudio, lo realizaremos con el primer transformador, al cual modificaremos los 100 W de pérdidas que tenía por los siguientes:

Trafo	Potencia (MVA)	Pfe (W)
T1	15	6984

*Tabla 25: Datos pérdidas transformador 1.*

Realizaremos, dos simulaciones con este transformador, una con una interrupción de corriente en su paso por cero, y una segunda con interrupción de corriente en su paso por el máximo valor de corriente. Y así, poder comparar dichos resultados con los obtenidos en el apartado 6.2.1.

Al final del apartado, realizaremos una comparación entre los mismos casos, pero con y sin pérdidas.

#### 6.4.2.1 PRIMERA SIMULACIÓN

Durante esta primera simulación realizaremos la interrupción de corriente en su paso natural por cero. Obteniendo los siguientes resultados:

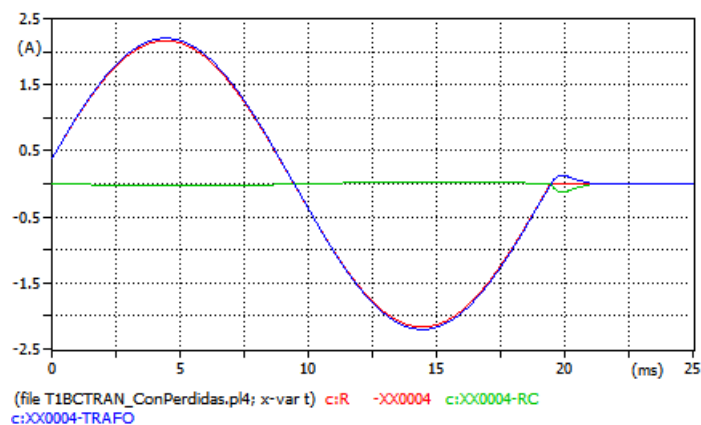


Figura 6.4-1 : Representación de las corrientes.

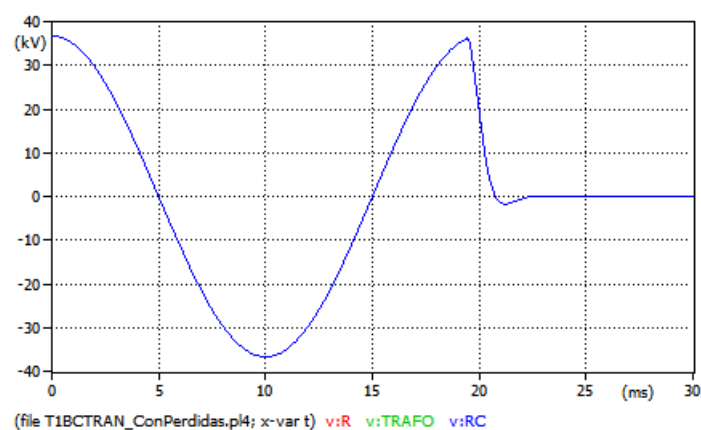


Figura 6.4-2 : Representación de las tensiones.

Numéricamente los resultados son los siguientes:

RESULTADOS OBTENIDOS EN LA SIMULACIÓN	
Corriente arrancada	0 A
Instante de tiempo de apertura del disyuntor	0,02 s
Valor máximo de tensión	36,7 KV
Valor máximo de corriente tras el corte	0,125 A

Tabla 26: Resultados obtenidos en la primera simulación del transformador 1 con pérdidas.

### 6.4.2.2 SEGUNDA SIMULACIÓN

Durante la segunda simulación, realizaremos la apertura del disyuntor en el paso por el máximo de la corriente. Obteniendo:

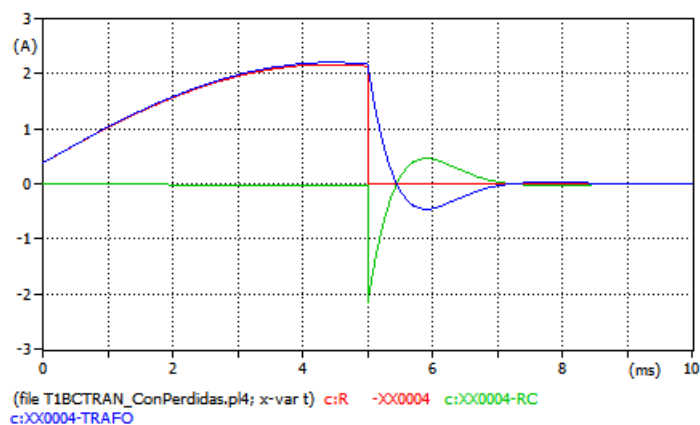


Figura 6.4-3 : Representación de las corrientes.

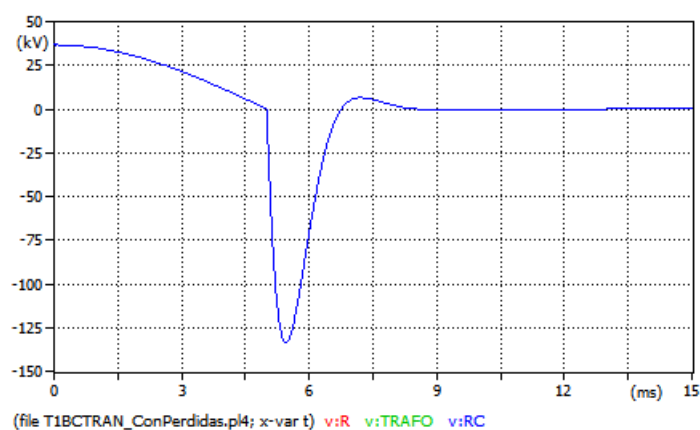


Figura 6.4-4 : Representación de las tensiones.

RESULTADOS OBTENIDOS EN LA SIMULACIÓN	
Corriente arrancada	2,2 A
Instante de tiempo de apertura del disyuntor	0,005 s
Valor máximo de tensión	134 KV
Valor máximo de corriente	2,2 A

Tabla 27: Resultados obtenidos en la segunda simulación del transformador 1 con pérdidas.

### 6.4.2.3 COMPARACIÓN SIMULACIONES CON PÉRDIDAS Y SIN PÉRDIDAS

Para poder realizar una comparación más exhaustiva, adjuntaremos los resultados gráficos de ambas simulaciones, con pérdidas de apenas 0.1 W y con pérdidas de 6984 W.

#### ▪ Apertura en el paso por cero de corriente

##### ➤ Pérdidas 0.1 W.

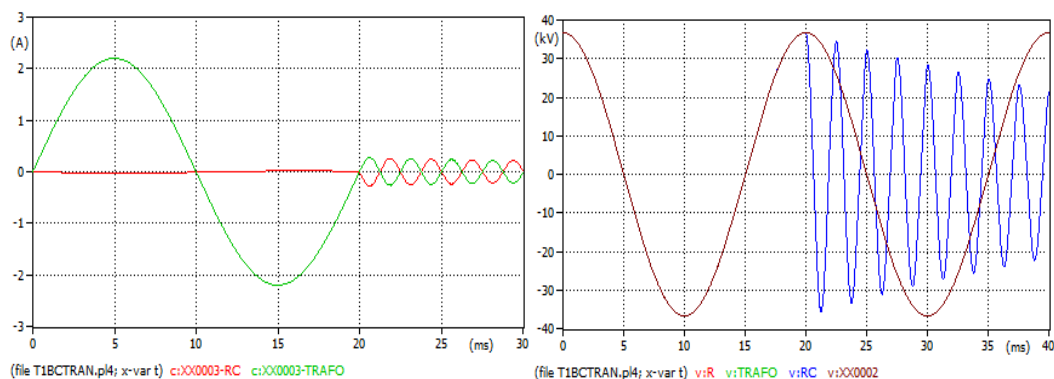


Figura 6.4-5 : Representación de las corrientes (FIGURA IZAQUIERDA) y tensiones (FIGURA DERECHA).

RESULTADOS OBTENIDOS EN LA SIMULACIÓN	
Corriente arrancada	0 A
Instante de tiempo de apertura del disyuntor	0,02 s
Valor máximo de tensión	36,7 KV
Valor máximo de corriente tras el corte	0,27 A

Tabla 28: Resultados obtenidos en la simulación de interrupción en el paso por cero de la corriente en el transformador 1 sin pérdidas.

➤ Pérdidas 6984 W.

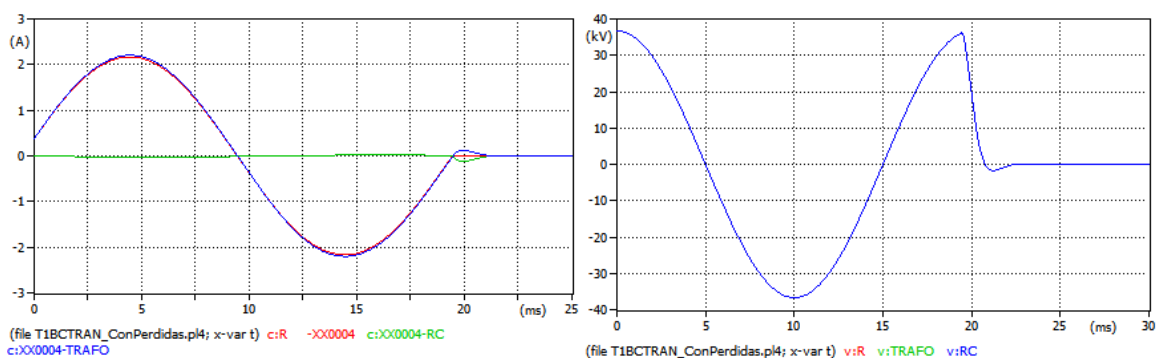


Figura 6.4-6 : Representación de las corrientes y tensiones.

RESULTADOS OBTENIDOS EN LA SIMULACIÓN	
Corriente arrancada	0 A
Instante de tiempo de apertura del disyuntor	0,02 s
Valor máximo de tensión	36,7 KV
Valor máximo de corriente tras el corte	0,125 A

Tabla 29: Resultados obtenidos en la simulación de interrupción en el paso por cero de la corriente en el transformador 1 con pérdidas.

Podemos observar con facilidad, que tras el corte las grandes oscilaciones que ocurrían en el caso con pérdidas mínimas desaparecen, tras una única y pequeña oscilación tanto en la corriente como en la tensión. Esto es debido a la desenergización que se da al aumentar las pérdidas. Por ello, al desenergizarse el sistema, la oscilación hasta hacerse cero es mucho más rápida. Además, si observamos con más detalle, el valor de cresta de esta pequeña oscilación también es menor que en el caso de pérdidas mínimas, que además de tener esta oscilación de la que venimos hablando, el valor de cresta también era mayor, aunque mínimamente mayor.

Por último, también cabe destacar que al introducir las pérdidas se ha introducido un pequeño desfase entre las corrientes y las tensiones de los condensadores y del transformador, esto se debe a que, con unas pérdidas mínimas, casi nulas, la carga era prácticamente inductiva pura y el desfase era exactamente de  $90^\circ$ , al introducir mayores pérdidas en el hierro, el valor resistivo de la carga también crece.

- **Apertura en el paso por el máximo de corriente**

➤ Pérdidas 0.1 W.

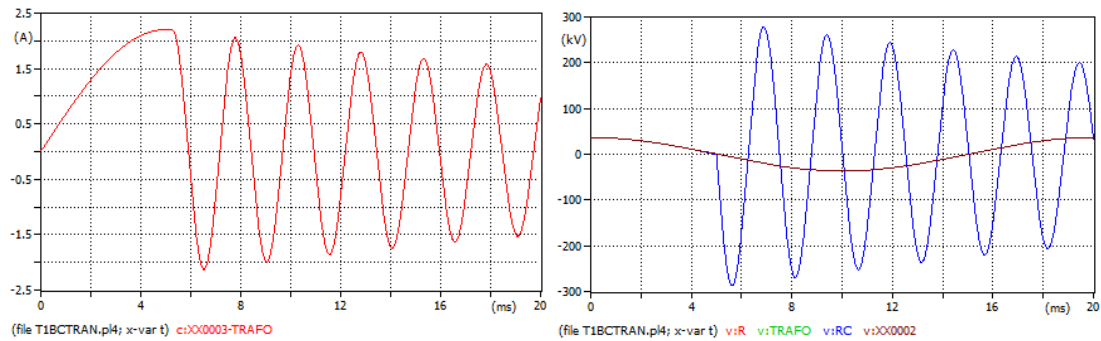


Figura 6.4-7 : Representación de las corrientes y tensiones.

RESULTADOS OBTENIDOS EN LA SIMULACIÓN	
Corriente arrancada	2,2 A
Instante de tiempo de apertura del disyuntor	0,005 s
Valor máximo de tensión	293 KV
Valor máximo de corriente	2,2 A

Tabla 30: Resultados obtenidos en la simulación de interrupción en el paso por el máximo de la corriente en el transformador 1 sin pérdidas.

➤ Pérdidas 6984 W.

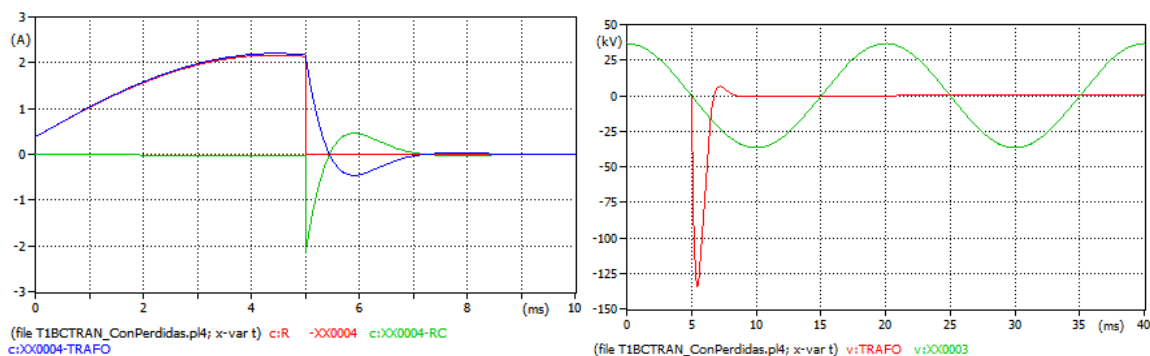


Figura 6.4-8 : Representación de las corrientes y tensiones.

RESULTADOS OBTENIDOS EN LA SIMULACIÓN	
Corriente arrancada	2,2 A
Instante de tiempo de apertura del disyuntor	0,005 s
Valor máximo de tensión	134 KV
Valor máximo de corriente	2,2 A

Tabla 31: Resultados obtenidos en la simulación de interrupción en el paso por el máximo de la corriente en el transformador 1 con pérdidas.

Como en el caso anterior las oscilaciones que se producían tras la apertura del interruptor desaparecen al haber aumentado las pérdidas, pero además esta desenergización tiene otra influencia en este caso. Ya que como podemos ver, tras abrir el interruptor en el máximo de corriente, la sobretensión generada tras el corte, se reduce considerablemente, casi la mitad, cuando las pérdidas en el hierro son mayores. Esto también es debido a esta disipación de energía mediante las pérdidas en el hierro.

En este caso, también podemos ver el pequeño desfase que se ha introducido, pero lo apreciaremos mejor en el siguiente caso con el transformador 3.



### 6.4.3 TRANSFORMADOR 3

La segunda comparación, la realizaremos con el tercer transformador, el cual pasará de los 100 W de pérdidas que tenía a las siguientes:

Trafo	Potencia (MVA)	Pfe (W)
T1	75	47147

Tabla 32: Datos de las pérdidas del transformador 3.

Nuevamente realizaremos, dos simulaciones con este transformador, una con una interrupción de corriente en su paso por cero, y una segunda con interrupción de corriente en su paso por el máximo valor de corriente. Y así, poder comparar de nuevo con los resultados obtenidos en el apartado 6.2.3.

#### 6.4.3.1 PRIMERA SIMULACIÓN

Durante esta primera simulación realizaremos la interrupción de corriente en su paso natural por cero. Obteniendo los siguientes resultados:

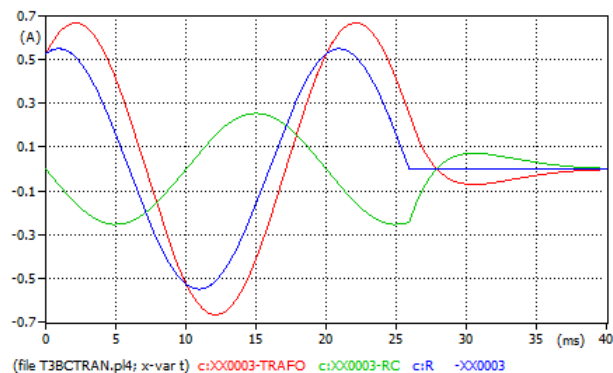


Figura 6.4-1 : Representación de las corrientes.

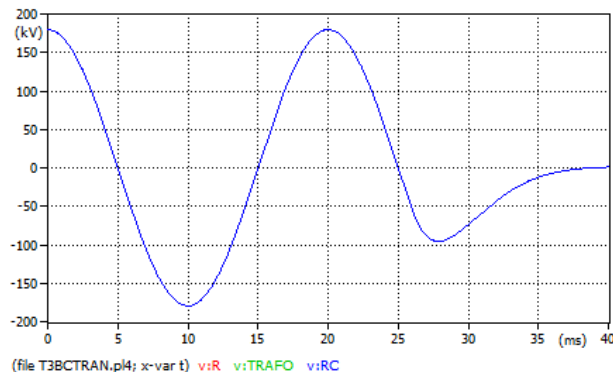


Figura 6.4-2 : Representación de las tensiones.

Numéricamente los resultados son los siguientes:

RESULTADOS OBTENIDOS EN LA SIMULACIÓN	
Corriente arrancada	0A
Valor máximo de tensión	179 KV
Valor máximo de corriente tras el corte	0,072 A

Tabla 33: Resultados obtenidos en la primera simulación con pérdidas del transformador 3.

#### 6.4.3.2 SEGUNDA SIMULACIÓN

Durante la segunda simulación, realizaremos la apertura del disyuntor en el paso por el máximo de la corriente. Obteniendo:

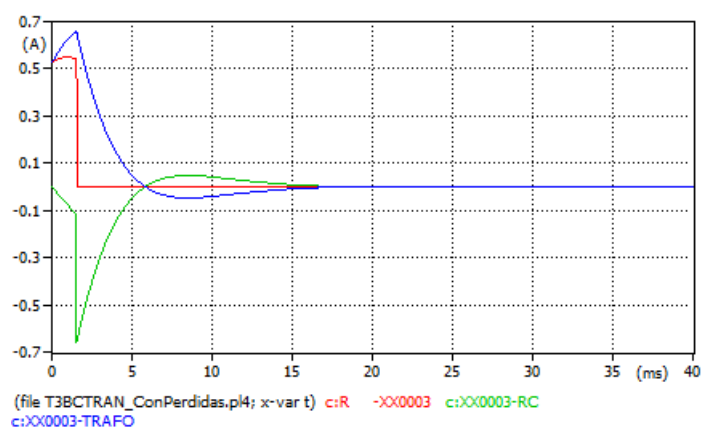


Figura 6.4-3 : Representación de las corrientes.

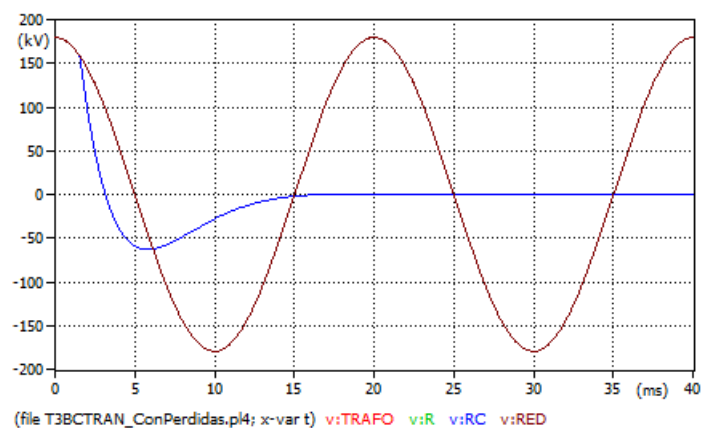


Figura 6.4-4 : Representación de las tensiones

RESULTADOS OBTENIDOS EN LA SIMULACIÓN	
Corriente arrancada	0,55 A
Instante de tiempo de apertura del disyuntor	0,001 s
Valor máximo de tensión	63 KV
Valor máximo de corriente tras el corte	0,048 A

Tabla 34: Resultados obtenidos en la segunda simulación con pérdidas del transformador 3.

#### 6.4.3.3 COMPARACIÓN SIMULACIONES CON PÉRDIDAS Y SIN PÉRDIDAS

Para poder realizar una comparación más exhaustiva, adjuntaremos los resultados gráficos de ambas simulaciones, en los dos casos con pérdidas de apenas 0.1 W y con pérdidas de 6984 W.

##### ▪ Apertura en el paso por cero de corriente

##### ➤ Pérdidas 0.1 W.

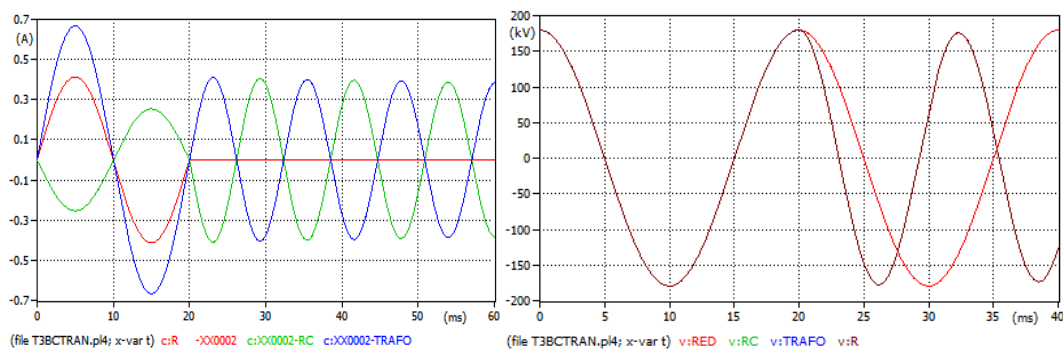


Figura 6.4-5 : Representación de las corrientes y tensiones.

RESULTADOS OBTENIDOS EN LA SIMULACIÓN	
Corriente interrumpida	0A
Instante de tiempo de interrupción	0,02 s
Valor máximo de tensión	179 KV
Valor máximo de corriente tras el corte	0,41 A

Tabla 35: Resultados obtenidos en la simulación de interrupción de corriente en el paso por cero del transformador 3 sin pérdidas.

➤ Pérdidas 47147 W.

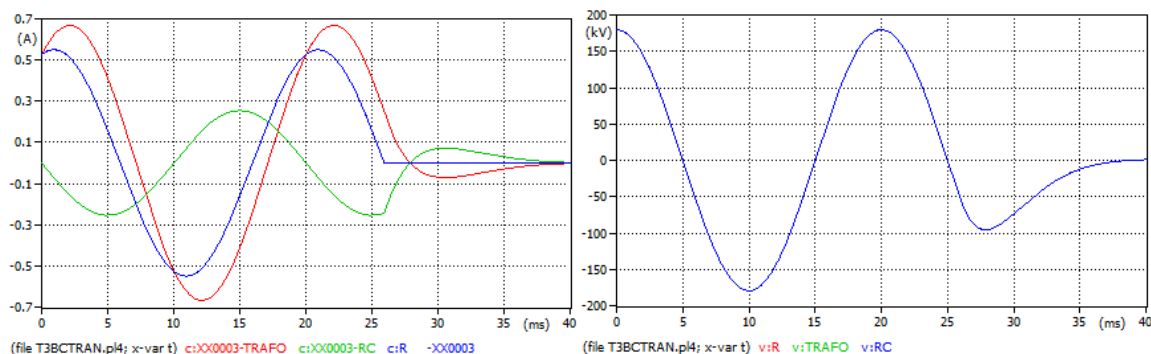


Figura 6.4-6 : Representación de las corrientes y tensiones.

RESULTADOS OBTENIDOS EN LA SIMULACIÓN	
Corriente arrancada	0A
Valor máximo de tensión	179 KV
Valor máximo de corriente tras el corte	0,072 A

Tabla 36: Resultados obtenidos en la simulación de interrupción de corriente en el paso por cero del transformador 3 con pérdidas.

En este caso, cuando interrumpimos la corriente en el paso natural por cero, podemos observar como con el otro transformador, que desaparecen las oscilaciones tras el corte y que, además, se reduce un poco el valor máximo de corriente tras el corte, todo debido a la desenergización que anteriormente habíamos explicado.

Pero sobretodo, cabe destacar en este transformador el gran desfase que se ha generado al introducir las pérdidas. Como ya hemos explicado al aumentar las pérdidas la carga deja de ser inductiva pura, pero en este caso al tener un valor de pérdidas en el hierro tan grande la carga es mucho más resistiva que con el anterior transformador y de ahí se debe a que el desfase sea tan grande.

- **Apertura en el paso por el máximo de corriente**

➤ Pérdidas 0.1 W.

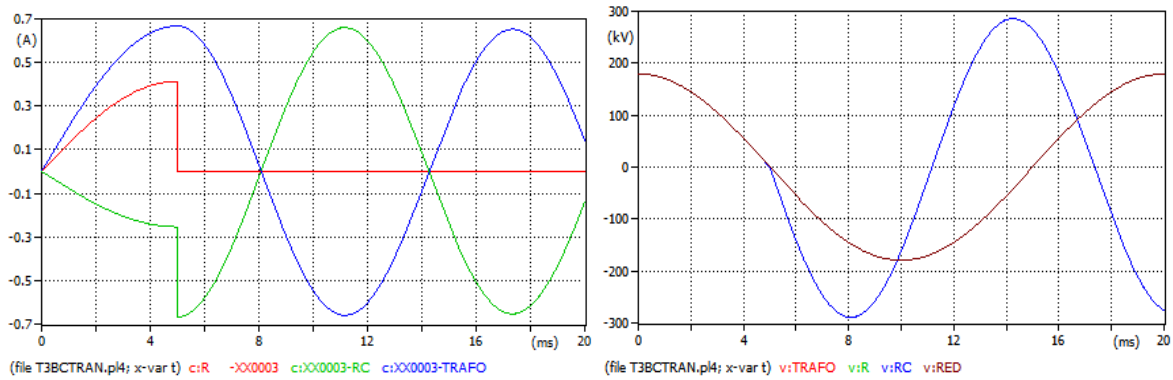


Figura 6.4-7 : Representación de las corrientes y tensiones.

RESULTADOS OBTENIDOS EN LA SIMULACIÓN	
Corriente interrumpida	0,6 A
Instante de tiempo de interrupción	0,005 s
Valor máximo de tensión	290,5 KV
Valor máximo de corriente tras el corte	0,667

Tabla 37: Resultados obtenidos en la simulación de interrupción de corriente en el paso por el máximo del transformador 3 sin pérdidas.

➤ Pérdidas 47147 W.

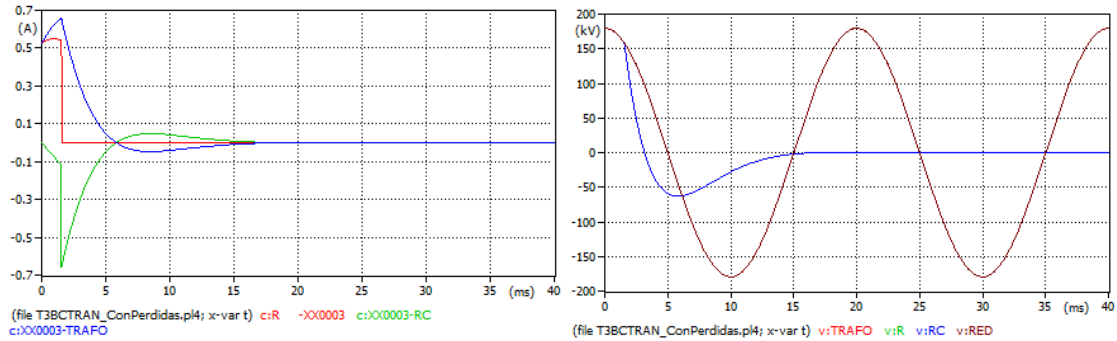


Figura 6.4-8: : Representación de las corrientes y tensiones.

RESULTADOS OBTENIDOS EN LA SIMULACIÓN	
Corriente arrancada	0,55 A
Instante de tiempo de apertura del disyuntor	0,001 s
Valor máximo de tensión	63 KV
Valor máximo de corriente tras el corte	0,048 A

Tabla 38: Resultados obtenidos en la simulación de interrupción de corriente en el paso por el máximo del transformador 3 con pérdidas.

En este caso, podemos observar mejor que con el anterior transformador el gran desfase que se ha producido que como comentamos en el anterior transformador es debido a que al aumentar las pérdidas en el hierro, el valor resistivo de la carga crece, y más en este caso en el cual las pérdidas son bastante elevadas.

Pero, además, tenemos que destacar que como con el anterior transformador la sobretensión que provocaba esta interrupción, se reduce en gran medida, pasando de 290 KV a 63 KV, cuatro veces menos, llegando a ser incluso menor que el valor de la tensión máxima normal de red. Debido a la disipación de energía mediante las pérdidas en el hierro.

#### 6.4.4 COMPARACIÓN TRANSFORMADOR 1 Y 3 CON PÉRDIDAS

En el primer caso, cuando hacemos que el disyuntor abra durante el paso por cero de la corriente, lo primero que podemos observar como diferencia entre los dos transformadores es como nos ocurrió en el capítulo 6.2 en los que comparamos estos transformadores también, que la corriente por el condensador en el transformador 3 es mucho mayor y como ya comentamos esto se debía a la curva magnetizante de este transformador, en las que la capacidad domina sobre la reactancia magnetizante del transformador. Además de esto, es fácil ver el gran desfase que se ha dado, al incluir las pérdidas en el hierro, el cual ocurre en ambos transformadores evidentemente, pero en el transformador 3 podemos ver que este desfase es muy exagerado debido a que las pérdidas en el hierro en él son muy elevadas en este caso.

En el segundo caso, cuando interrumpimos la corriente en el paso por el máximo de corriente de la red, caso en el que se dan las importantes sobretensiones que venimos estudiando. Hemos podido comprobar que al incluir estas pérdidas en el hierro y producirse la desenergización del sistema las sobretensiones también se ven afectadas, y son reducidas en gran medida, reduciéndose a la mitad en el primer transformador y a una cuarta parte en el tercer transformador. En este último, es tal la disipación de energía que la reducción de esta sobretensión es tal que pasa a ser incluso menor que el valor de cresta normal de la tensión de la red.

# CAPÍTULO 7

## RESULTADOS

### 7.1 SOBRETENSIONES TRANSITORIAS EN EL TRANSFORMADOR

El origen de las sobretensiones que hemos estado estudiando, como ya se había comentado anteriormente, se debe fundamentalmente al corte de corrientes antes de su paso natural por cero.

De esto modo, hemos comprobado que las sobretensiones generadas, pueden llegar a tener magnitudes de muy alto valor, y, por tanto, muy peligrosas para el propio transformador y el resto de los equipos en serie con el mismo, pues pueden llegar a poner en peligro el sistema de aislamiento del mismo.

Además, hemos estudiado otros factores que pudieran afectar a la magnitud de esta sobretensión, como son los instantes de interrupción de corriente, las capacidades del sistema del transformador y las pérdidas en el hierro del transformador.

#### 7.1.1 ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE DIFERENTES FACTORES EN EL VALOR DE LA SOBRETENSIÓN

##### *7.1.1.1 INFLUENCIA DE LOS INSTANTES DE CORTE*

En el apartado 6.2 estudiamos como interrumpir la corriente en distintos instantes de tiempo influía en las sobretensiones generadas cuando el disyuntor abría el circuito.

Estudiamos dos casos, la apertura en su paso natural por cero y la apertura en el instante en el que la corriente pasaba por su máximo. Estos dos casos, los realizamos para tres transformadores distintos, para así ver la influencia que tenían dichos casos, en transformadores de grandes y pequeñas potencias.

Para el primer caso, la apertura en el instante en que la corriente pasa por su paso natural por cero, como podíamos suponer antes de ello, la sobretensión generada en este caso será nula. Tras el corte, que coincide con el instante de máxima tensión, la tensión solamente oscilará de su valor máximo hasta cero, sin haber generado ningún pico de sobretensión mayor que su valor de pico normal, como pudimos ver en la figura 6.2-7.



En este instante, la capacidad del transformador quedó cargada y la inductancia, al contrario, quedó descargada, por ello, es cuando la capacidad comienza a descargarse a través de la inductancia, generando las pequeñas oscilaciones de corriente que podíamos observar tras el corte en la figura 6.2-6

Para el segundo caso, en el que el disyuntor interrumpía la corriente en el instante en el que la corriente pasaba por su máximo positivo, en el primer cuarto de ciclo, pudimos ver como ya sí que se generaba dicha sobretensión.

La interrupción de corriente, además coincidía con el paso por cero de la tensión y tras la apertura del disyuntor esta tensión crecía de tal manera que pasaba a tener valores de varias veces su valor de cresta normal. Tras alcanzar el máximo valor de sobretensión entraba en un proceso oscilatorio debido a que las capacidades entrarían en un proceso de carga y descarga alimentadas en este caso por las inductancias, que, en este caso, al interrumpir la corriente en su punto máximo, estas se habían quedado cargadas con este valor máximo de corriente.

La corriente, tras el corte desde su punto máximo comenzaba a oscilar hasta cero como en el caso anterior había hecho la tensión. Y como acabamos de comentar, también al contrario que en el caso anterior, ahora las bobinas del condensador eran las que alimentaban el condensador y juntas comenzaban a oscilar de igual manera, pero con distinto signo hasta hacerse nulas.

El estudio lo realizamos con tres transformadores, de diferentes potencias nominales, 15, 25 y 75 MVA. Los resultados teóricamente, fueron evidentemente los mismos, la sobretensión era generada en la apertura en el máximo de corriente y las corrientes se comportaban de igual manera.

Pero pudimos realizar una comparación numérica para poder hacernos una idea del gran valor de dichas sobretensiones en comparación a la potencia de los transformadores.

La mayor sobretensión la generaba el primer transformador, seguido del tercero. Pero para el primer transformador, la sobretensión era de 11 veces mayor a la tensión nominal, en el segundo de 8 y en el tercero de 2 veces mayor. De primeras, parece contradictorio que la mayor sobretensión la genere el transformador más pequeño, pero esto es debido a la corriente arrancada en cada caso, ya que a pesar de que su potencia sea menor, la corriente interrumpida en la línea por el disyuntor en el primer transformador es mayor que en los otros, y cómo podemos ver en la siguiente fórmula en la que el valor de  $U_0$  es nulo, pues se interrumpe cuando la tensión es nula, el valor de la tensión máxima depende directamente del cuadrado de la corriente interrumpida.

$$U_{\max} = \sqrt{U_0^2 + \frac{L_t}{C_t} I_0^2}$$

La disminución de la corriente de vacío del transformador al aumentar la tensión es debida a que los diferentes transformadores no tienen idéntica tensión nominal primaria, sino que los transformadores más grandes tienen más tensión nominal que los pequeños, debido a ello el número de espiras del arrollamiento primario de los transformadores grandes es mayor que el de los transformadores pequeños, y aunque el número de amperios-vuelta precisos para crear el flujo es mayor en un transformador grande que en uno pequeño, la corriente de vacío disminuye.

Por otro lado, destacamos que en el tercer transformador la corriente tomada por las capacidades parásitas del transformador, era mucho mayor que en los dos primeros transformadores. Y el valor de esta corriente capacitiva que en los otros era prácticamente nula, ahora se aproximaba al valor de la red. Esto era debido a que las capacidades parásitas aumentan con las dimensiones del transformador, y esta corriente de tipo capacitivo compensa la corriente magnetizante inductiva del transformador dando una curva aparente de magnetización de tipo "cobra". Además, de la corriente del condensador, en el tercer transformador la corriente que circulaba por el mismo, también era mayor que la circulaba por la red, cuando en los anteriores transformadores habían sido prácticamente idénticas, esto se debe a que el valor de la inductancia del tercer transformador era muy elevado y necesita un aporte de corriente mayor.

#### *7.1.1.2 INFLUENCIA DE LOS CONDENSADORES CONSIDERADOS EN EL TRANSFORMADOR*

Durante el capítulo 6.3, comparamos la influencia que tenía el considerar sólo la capacidad parásita a tierra del lado de alta tensión, frente a considerar todas las capacidades parásitas, para obtener la cuantía de la sobretensión cuando el disyuntor abre el circuito.

Cuando interrumpíamos corriente cuando pasa por su máximo, evidentemente también se generaban sobretensiones, pero pudimos comprobar que cuando solo teníamos instalado un condensador en el lado de alta tensión estas sobretensiones eran casi 1.5 veces mayores que cuando instalábamos los tres condensadores. Si observamos la siguiente ecuación, que llevamos tiempo viendo para calcular la tensión máxima, sabiendo que en este caso  $U_0$  es nulo. Podemos ver, que el valor de esta tensión máxima depende inversamente de la raíz del equivalente de los condensadores, por ello, al tener más condensadores, el valor de  $C_t$ , es mayor y, por tanto, menor el de  $U_{\max}$ .

$$U_{\max} = \sqrt{U_0^2 + \frac{L_t}{C_t} I_0^2}$$

Por tanto, para reducir el valor de las sobretensiones que se producen cuando abrimos el circuito, es preciso considerar las capacidades del transformador, en alta, baja tensión y entre ellos.

Aparte de las sobretensiones generadas, observamos que la corriente que aportaba la red era menor, cuando instalábamos todas las capacidades. Esto se debía a que ahora la corriente no solo la aportan un condensador y la red, si no la red y los otros tres condensadores. Y es la red, la que se ve afectada en este aspecto, ya que reduce un 34.5% en el transformador 4 y un 22% en el transformador 5, la corriente que aporta al transformador, pasando a ser aportada por el condensador entre baja y alta, ya que el transformador consume la misma corriente.

### 7.1.1.3 INFLUENCIA DE LAS PÉRDIDAS EN EL HIERRO DEL TRANSFORMADOR

En el último apartado del capítulo 6, el 6.4, simulamos diferentes casos, incluyendo las pérdidas en el hierro reales de los transformadores que estudiamos, y pudimos comprobar la influencia que estas tenían en los transformadores y sobretodo en la base de nuestro estudio en las sobretensiones generadas al interrumpir corriente en el sistema del transformador. Y todo, debido a la desenergización que provocan las pérdidas en el sistema.

En primer lugar, al incluir las pérdidas observamos que las oscilaciones que se daban en los casos sin pérdidas tanto en la tensión como en la corriente tras la apertura del disyuntor, desaparecían, tras una única y menor oscilación. Debido a la disipación de la energía magnética almacenada al ambiente que provocan estas pérdidas la reducción de corriente y tensión hasta hacerse nulas es mucho más rápida.

También comprobamos que, al incluir las pérdidas en el hierro, se introducían una serie de desfases entre las corrientes y las tensiones. Esto era provocado por la carga resistiva, que para que las pérdidas en el hierro crezcan, debe de ser mayor el valor de  $R_{Fe}$ , como vemos en la siguiente ecuación.

$$P_{Fo} = 3R_{Fe}I_{Fo}^2 = 3\frac{U_{Fo}^2}{R_{Fe}}$$

Anteriormente, al no tener pérdidas, esta resistencia era infinita, y por tanto la impedancia que presetna el transformador es inductiva pura, lo que hacía que el desfase entre ondas fuera exactamente de 90°.

Pero lo importante en nuestro estudio es qué sucede con las sobretensiones cuando abrimos el interruptor con la corriente en su punto máximo. Pues al introducir las pérdidas en el hierro, estas sobretensiones se veían reducidas en gran medida a la mitad en uno de los casos y más de cuatro veces menos en el otro, en este último llegando a desaparecer la sobretensión, ya que el pico que provoca, es menor que el valor de cresta en un funcionamiento normal.

En el transformador 3, las pérdidas son tan grandes la disipación de la energía magnética almacenada se realiza en muy breve tiempo y la sobretensión tan pequeña.

Por tanto, podríamos decir que deben considerarse estas pérdidas en el cálculo de las sobretensiones generadas. En este caso, considerar las pérdidas reduciría las sobretensiones, reduciendo el peligro de los aislamientos, en cuanto a las sobretensiones.

# CAPÍTULO 8

## RESUMEN Y CONCLUSIONES

### 8.1 RESUMEN DEL TRABAJO REALIZADO

Durante todo este trabajo fin de grado hemos tenido el objetivo de estudiar las sobretensiones generadas en la desconexión en vacío de un transformador. Para ello, siempre hemos comparado el caso más ideal que sería desconectarlo en su paso natural por cero, con el más desfavorable, interrumpir la corriente en su paso por el máximo.

Por ello, el primer paso fue comparar estas sobretensiones que esperábamos abriendo el disyuntor en estos dos casos, cuando la corriente pasaba por su paso natural por cero y cuando la corriente pasaba por su máximo.

Tras el primer caso pudimos comprobar que las sobretensiones se generaban cuando abríamos el interruptor en un punto diferente a su paso natural por cero. Además, cuando ocurría en el punto máximo de corriente estas sobretensiones llegaban a ser de varias veces su tensión nominal, lo cual, podría generar grandes dificultades para los aislamientos. Por ello, en el resto de simulaciones siempre compararíamos estas dos aperturas del sistema.

El segundo caso que realizamos fue, comparar el caso más simple teniendo solo un condensador en el lado de alta del transformador con un caso algo más complejo que era añadir otros dos condensadores, uno entre los arrollamientos de alta y baja y otro en el lado de baja tensión.

En este caso realizamos de nuevo las mismas simulaciones y comparamos en dos transformadores distintos, que sucedía con las sobretensiones cuando el disyuntor abría el sistema en el punto máximo de las corrientes en los dos casos, con uno o tres condensadores. Pudiendo observar así todas las influencias que ello tenía.

Y en el tercer y último caso, comprobamos la influencia que tenían sobre las sobretensiones las pérdidas en el hierro del transformador, ya que en los casos anteriores habíamos supuesto las pérdidas prácticamente nulas, ya que introducimos un valor de apenas 100 W de pérdidas.

Nuevamente, realizamos las mismas simulaciones y ofrecimos una comparativa de las dos interrupciones de corriente, en el paso por cero y en el máximo, con los transformadores con las pérdidas reales, frente a los transformadores con los 100 W que habíamos supuesto de pérdidas hasta entonces.

## 8.2 CONCLUSIONES

Nuestro objetivo principal fue estudiar las sobretensiones al desconectar en vacío un transformador, y para ello y tras la realización de diferentes simulaciones mediante el programa ATPDraw, hemos podido obtener diferentes conclusiones de cómo afectan los diferentes aspectos que hemos tenido en cuenta en el estudio.

Estudiamos los tres siguientes aspectos, de los cuales podemos decir que obtuvimos los siguientes resultados a cerca de las sobretensiones generadas en la desconexión:

- Instante de interrupción de corriente.

Tras estudiar teóricamente en el capítulo 5, que el instante más conveniente para interrumpir corriente es el paso natural por cero, quisimos comprobarlo simulándolo en ATP, con el caso más complicado, interrumpir la corriente en su paso por el máximo.

Evidentemente, y tras realizar dicha simulación con tres transformadores diferentes pudimos comprobar que el caso más desfavorable para abrir el sistema es cuando la corriente pasaba por su máximo debido a las grandes sobretensiones que generaba en el transformador, lo cual podría ser perjudicial para él pues podría superar el nivel de aislamiento del mismo.

- Condensadores considerados en el transformador.

En los transformadores podemos considerar o no, los condensadores a tierra de cada arrollamiento y otro más entre ellos. Normalmente, no los tenemos en cuenta para simplificar los cálculos. En este caso, quisimos comprobar, qué aportaban estos a nuestro objetivo del estudio de las sobretensiones.

Por ello, y como habíamos trabajado hasta entonces, realizamos un par de simulaciones solamente con el condensador de alta tensión, y posteriormente realizamos las mismas, conectando los otros dos transformadores, en baja tensión a tierra y otro conectando alta con baja.

Finalmente, pudimos comprobar que al incluir los otros dos condensadores se reducían estas sobretensiones, ya que la sobretensión depende inversamente de ellos.

Por tanto, para nuestro objetivo, conseguir reducir estas sobretensiones generadas en la apertura del transformador en vacío, conectar los tres condensadores del transformador afecta positivamente a reducir dichas sobretensiones.

- Pérdidas en el hierro.

En cuanto, al último aspecto que tuvimos en cuenta para comprobar como afectaban las pérdidas en el hierro a las sobretensiones del transformador, realizamos dos nuevas simulaciones incluyendo las pérdidas reales que tenían estos transformadores. Posteriormente, realizamos una pequeña comparación con los mismos transformadores, pero con pérdidas nulas, que era como habíamos trabajado hasta entonces.

Tras ello, pudimos ver que estas pérdidas en el hierro, no son más que una forma de desenergización del sistema, mediante el cual disipa energía en forma de calor. Al desenergizarse, estas sobretensiones también pierden fuerza y reducen su valor en gran medida mucho más incluso que con los condensadores.

Por tanto, y para concluir podemos resumir, que en primer lugar el caso más desfavorable para que el disyuntor abra el sistema interrumpiendo corriente es en el instante en el que la corriente pasa por su máximo, y el más favorable en su paso natural por cero en el cual no genera ningún tipo de sobretensión. En segundo lugar, que, si estas sobretensiones existen o pueden llegar a darse, el mejor caso es considerar los tres condensadores para reducir dicha sobretensión. Y en tercer y último lugar, pérdidas en el hierro siempre tendremos en un transformador, ya que estos nunca llegarán a ser 100% ideales, y estas pérdidas acarrearán otro tipo de problemas como la reducción del rendimiento del transformador y el aumento de temperatura por disipación de energía en forma de calor, pero al menos, sabremos que ellas también nos ayudarán en cierta manera a reducir las sobretensiones.

### 8.3 TRABAJOS FUTUROS

En cuanto a la propuesta de trabajos futuros, se pueden citar los siguientes:

- Ampliar el estudio a transformadores trifásicos, en los cuales al abrir el interruptor el ángulo de fase de la tensión (y por tanto de la corriente) es diferente para cada una de las fases.
- La apertura del interruptor con corte de corriente provoca unas sobretensiones en el transformador, pero en el otro polo del disyuntor aparece un pulso de corriente que se debe extinguir, sería interesante analizar la propagación del pulso de corriente cortado hacia la fuente, así como las sucesivas reflexiones de onda.
- Repetir el estudio realizado utilizando el modelo de transformador híbrido (XFORMER).
- Comparar los resultados del estudio con los resultados en el caso de un transformador Yyd para analizar la influencia del tercer arrollamiento conectado en triángulo.

## CAPÍTULO 9

### BIBLIOGRAFÍA

UNE-EN 60071, Coordinación de aislamiento. (2006). 1st ed. AENOR.

UNE-EN 60071, Coordinación de aislamiento. (2006). 1st ed. AENOR.

Sanz Feito, J. (2002). *Máquinas eléctricas*. 1st ed. Madrid [etc]: Prentice Hall.

Burgos, J. *CIRCUITOS MAGNÉTICOS Y TRANSFORMADORES, CONSTITUCIÓN FÍSICA DE TRANSFORMADORES*.

[Das10] J.C. Das “Transients in electrical systems” McGrawHill 2010.

THÉOLEYRE, S. (2001). Las técnicas de corte en MT. Cuaderno Técnico Schneider Electric, 193.

[27] Sites.google.com. (2016). El ATP/EMTP - CAUE - Comité Argentino de Usuarios del EMTP/ATP. [online] Available at: <https://sites.google.com/site/atpcaue/el-atp-emtp> [Accessed 28 Sep. 2016].

Lobo, L. (2014). MODELO DE TRANSFORMADORES EN SATURACIÓN UTILIZANDO FUNCIONES DE CÁLCULO DE PARÁMETROS EN EMTP-RV. *Journal of Tropical Engineering*, [online] 24(2). Available at: <http://revistas.ucr.ac.cr/index.php/ingenieria/article/view/8251/15609> [Accessed 28 Sep. 2016].

Dután, L. (2016). Modelación de Transformadores para Estudios de Energización usando ATP-EMTP. *CELEC EP TRANSELECTRIC*.

Martínez Velasco, J. (n.d.). *Coordinación de aislamiento en redes eléctricas de alta tensión*.

Greenwood, A. (n.d.). *Electrical Transients in power systems*. 2nd ed.

Martinez, and Mork, (2005). Parameter Determination for Modeling System Transients- Part III: Transformers. 1st ed.